

# TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA  
POLITÈCNICA SUPERIOR  
UNIVERSITAT DE LLEIDA  
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: Montse Lamana Villegas

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol de Treball Final de Grau:

**Instalación de sistema de bombeo fotovoltaico para riego en terreno cultivable**

Director/a: Jérôme Barrau

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2018



## Contenido

1.	Introducción .....	2
2.	Introducción a los sistemas de bombeo fotovoltaico .....	4
2.1	Agua subterránea .....	5
2.2	Principio fotoeléctrico .....	6
2.3	Arquitectura y componentes del sistema .....	8
3.	Dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico.....	15
3.1	Necesidades hidráulicas .....	15
3.2	Radiación solar disponible - HSP .....	15
3.3	Altura hidráulica de bombeo.....	17
3.4	Mes de dimensionado y requerimientos del equipo de bombeo de agua .....	20
3.5	Consumo energético estimado de la bomba .....	20
3.6	Número y disposición de los módulos fotovoltaicos .....	21
3.7	Regulador .....	22
3.8	Cableado eléctrico.....	23
3.9	Protecciones.....	24
3.10	Organigrama para el dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico .....	25
4.	Ejemplo de dimensionamiento .....	26
4.1	Situación actual .....	26
4.2	Dimensionado del bombeo fotovoltaico.....	28
4.2.1	Necesidades hidráulicas .....	28
4.1.1	Determinación de la radiación solar disponible.....	28
4.1.2	Determinación de la altura hidráulica de bombeo .....	29
4.1.3	Mes de dimensionado .....	29
4.1.4	Determinación del equipo de bombeo .....	30
4.1.5	Consumo energético estimado de la bomba sumergible .....	32
4.1.6	Determinación del número y disposición de los módulos .....	33
4.1.7	Determinación del regulador .....	36
4.2.9.	Determinación del cableado eléctrico y protecciones .....	37
5.	Conclusiones.....	39
6.	Apéndice.....	43
6.1	Código Matlab para la resolución de los cálculos en la instalación .....	43
6.2	Bomba sumergible PS2-600 C-SJ5-8.....	46
6.3	Módulo fotovoltaico REC 260PE.....	48

## **1. Introducción**

El objeto de este proyecto es el dimensionamiento de un sistema de bombeo de agua solar fotovoltaico directo para el riego por goteo en un terreno dedicado al cultivo del avellano y nogal situado en la población de Vimbodí i Poblet (Tarragona, Cataluña).

Para ello, se ha realizado un estudio previo de la localización, dimensiones del terreno, consumos hidráulicos durante un año y clima de la zona para conocer la radiación solar disponible con el objetivo de satisfacer la demanda hidráulica.

Posteriormente se ha seguido el procedimiento expuesto en la *“Guía para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica, Sandia National Laboratories, Southwest Technology Development Institute (NMSU/SWTDI)”*, dimensionando la instalación con los datos hidráulicos y energéticos del mes más deficitario, es decir, el mes con una demanda hidráulica más elevada en relación a la energía solar disponible, para poder asegurar el buen funcionamiento del sistema el resto del año.

Finalmente se ha determinado la configuración del sistema y los equipos necesarios para el bombeo solar de agua subterránea desde un pozo a una balsa situados en el terreno.

## 2. Introducción a los sistemas de bombeo fotovoltaico

Las fuentes de energía son los fenómenos físicos o químicos existentes en la naturaleza de los que la humanidad puede obtener energía utilizable en sus actividades. Se clasifican en dos grandes grupos: energías renovables y no renovables según sean sus recursos ilimitados o limitados.

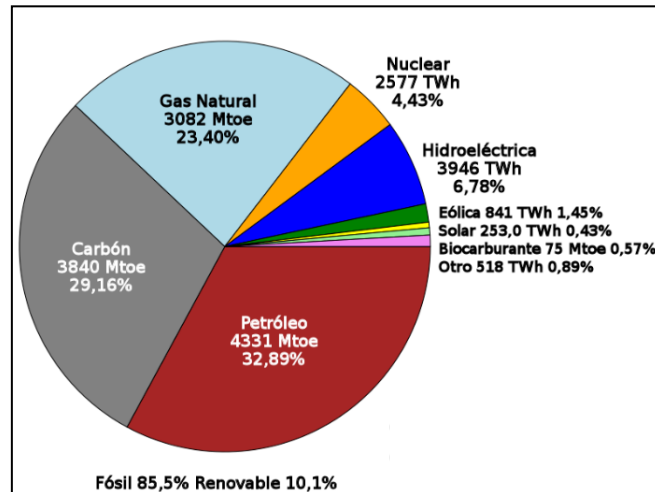


Figura 1 – Diagrama de las fuentes de energía utilizadas para el consumo en 2014

- Las energías no renovables, o combustibles fósiles, una vez utilizados tienen un periodo de regeneración muy elevado, y en ocasiones, no existe este periodo. Se forman a partir de sustancias orgánicas que se han acumulado en el subsuelo terrestre: plantas, animales y otros seres vivos. Con el paso de millones de años, sufren transformaciones físicas y químicas hasta llegar al punto en que se convierten en unos componentes de los que es fácil convertirlos en energía: energía fósil.

Diferenciamos tres grandes tipos de energía fósil:

- El carbón, extraído mediante exploraciones minerales y que actualmente suministra el 25% de la energía primaria consumida en el mundo.
- El petróleo, se constituye por una mezcla de componentes orgánicos y es una de las principales energías utilizadas en los medios de transporte.
- El gas natural, utilizado como combustible en los hogares y en la industria.

A parte de la energía fósil, como energía no renovable también existe la energía nuclear. Esta energía procede de reacciones de fisión o fusión de átomos en las que se liberan gigantescas cantidades de energía con gran poder calorífico, y mayoritariamente se usan para producir electricidad.

- Las energías renovables pueden utilizarse de manera continuada para producir energía, ya que se regeneran fácilmente o porque son una fuente inagotable.

Algunos ejemplos son:

- La energía hidráulica, obtenida a través del curso del agua.
- La energía eólica, proveniente del viento.
- La energía geotérmica, proviene del calor interno de la tierra.

- Energía de biomasa, proviene del aprovechamiento energético del bosque o de sus residuos.
- Energía solar, que proviene de la radiación del Sol y puede ser transformada en dos tipos de energía: térmica o eléctrica, también llamada energía solar fotovoltaica.

Hoy en día, la tecnología fotovoltaica disponible comercialmente es una alternativa real para su aplicación en diversas tareas domésticas, industriales y agropecuarias. Una de las aplicaciones más comunes en el sector agropecuario es el bombeo de agua.

El bombeo de agua con energía solar fotovoltaica es una aplicación de especial interés en sistemas aislados y ofrece grandes ventajas de sostenibilidad medioambiental, en comunidades rurales donde no hay suministro de energía eléctrica convencional, y tiene un bajo coste de operación y mantenimiento. También son de gran utilidad dada su modularidad, es decir, se puede modificar proporcionalmente el número de paneles y de cintas de riego si en un futuro se desea.

Una instalación de bombeo de agua con energía solar consta de los paneles o módulos fotovoltaicos para producir energía eléctrica en corriente continua. Esta electricidad es consumida directamente por una bomba hidráulica sumergible, también en corriente continua, que bombea el agua desde el fondo de un pozo, el cual contiene agua subterránea, hasta un depósito con una cierta altura o directamente a la red de distribución de riego.

Si se bombea el agua directamente a la red de distribución, la falta de uniformidad derivada de la dependencia del rendimiento de los módulos fotovoltaicos a la intensidad de radiación solar, puede ser suplida por la instalación de un sistema de baterías de acumulación, de manera que la alimentación de corriente hacia la bomba se realice a través de ellas. Con ello se consigue una alimentación de corriente eléctrica constante que asegura un suministro uniforme de agua por parte de la bomba, independiente de las condiciones de radiación solar.

Una alternativa a la instalación de baterías, es el sistema de bombeo solar directo. En este sistema, para conseguir la uniformidad en el riego se construye un depósito en altura de manera que el flujo de agua extraída por la bomba se dirija hacia este depósito de acumulación y permitiría realizar el riego de manera constante, mientras el depósito disponga de un nivel de agua mínimo.

## **2.1 Agua subterránea**

Las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran bajo la superficie terrestre proveniente de la evapotranspiración, escorrentía e infiltración en el suelo y generalmente se acumulan en acuíferos, que son formaciones geológicas donde se almacena y circula el agua aprovechando la porosidad, filtración y la figuración de la roca.



**Figura 2** – Fenómenos medioambientales de los cuales proviene el agua subterránea.

- La evapotranspiración es la cantidad de agua que se produce a través de la evaporación del agua presente en la superficie terrestre y la transpiración de las plantas.
- La escorrentía es el agua de lluvia que discurre libremente sobre la superficie del terreno.
- La infiltración en el suelo es el agua absorbida por la superficie terrestre proveniente de las precipitaciones, que se almacenan como agua subterránea y puede ser extraída por bombeo.

El agua subterránea en áreas con un régimen de pluviosidad bajo, aguas fósiles, están almacenadas en bolsas de agua formadas en épocas pasadas y no pueden ser recargadas. Cuando el régimen de pluviosidad es alto, el agua de las precipitaciones infiltra en la tierra y se mantiene en un nivel no necesariamente horizontal ni paralelo al suelo, llamado nivel freático. Para poder extraer el agua de los acuíferos se realizan excavaciones que alcanzan el nivel freático llamadas pozos. Cuando se retira una cantidad de tierra a ese nivel, queda una porción de agua pura que se puede extraer, en este caso, por medio de una bomba sumergible alimentada por energía solar fotovoltaica.

## 2.2 Principio fotoeléctrico

Los sistemas fotovoltaicos se basan en el efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación, es decir, las radiaciones de la luz solar se transforma en energía eléctrica.

Este efecto tiene lugar en las células fotoeléctricas interconexionadas entre sí en los módulos o paneles fotovoltaicos. Éstas quedarán dispuestas en serie o paralelo con el objetivo de que la tensión y corriente que proporcione el módulo se ajuste al valor que se requiera.

Cuando un módulo recibe radiación solar, los fotones que componen la radiación inciden sobre las células y pueden ser reflejados, absorbidos o pasar a través del panel. Los

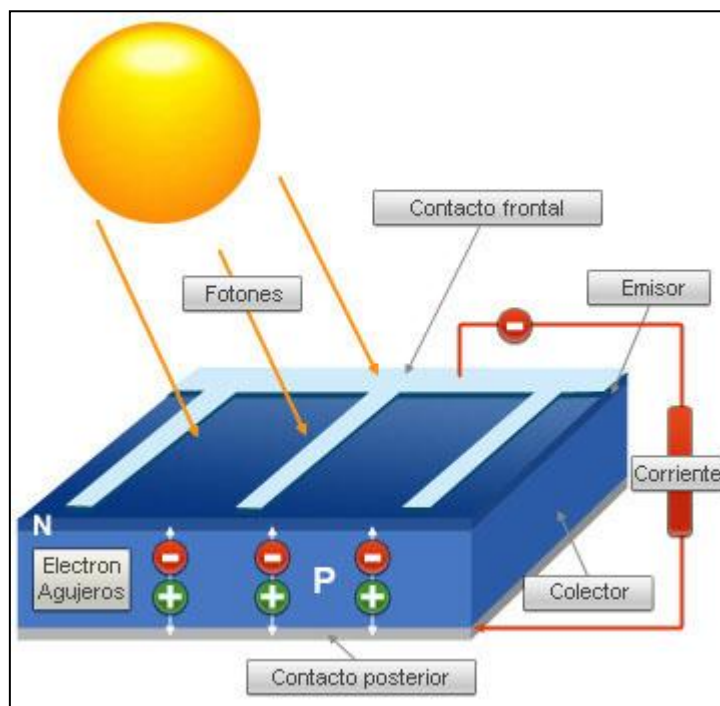
absorbidos, son los que finalmente van a generar electricidad dado que la energía que porta el fotón es transferida a los átomos que componen el material de la célula y éstos se desprenden de su posición normal y entran a formar parte del circuito eléctrico generado. Por lo tanto, el material de las células de los paneles debe de garantizar que sus átomos sean capaces de liberar electrones para crear corriente eléctrica al recibir energía. Los materiales semiconductores poseen esta propiedad y actúan como aislantes a baja temperatura y como conductores cuando se aumenta la energía que incide sobre ellos.

Para mejorar aún más las prestaciones de los semiconductores, se crea dos capas diferentes dopadas (tipo P y tipo N) para crear un campo eléctrico de manera que al recibir la luz solar, los electrones puedan ser atrapados por el campo eléctrico y formar así una corriente eléctrica.

El material más utilizado en la actualidad para las células solares es el silicio en dos formas: monocristalino o policristalino.

- Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de secciones cortadas de una barra de silicio cristalizado de una sola pieza.
- Las células de silicio policristalino se obtiene al partir de secciones cortadas de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales.

El rendimiento y la uniformidad del silicio monocristalino es superior al policristalino y como consecuencia, ofrece una mayor potencia nominal.



**Figura 3** – Efecto fotoeléctrico en los módulos fotovoltaicos



## 2.3 Arquitectura y componentes del sistema

La instalación solar fotovoltaica para bombeo directo de agua está diseñada para una implementación directa del uso de paneles fotovoltaicos en un sistema de riego con bomba de extracción de agua. En general, consiste en el acoplamiento un generador fotovoltaico a un motor-bomba sumergible en un pozo, para la extracción y almacenamiento de agua en un depósito o tanque, y sigue el siguiente esquema:

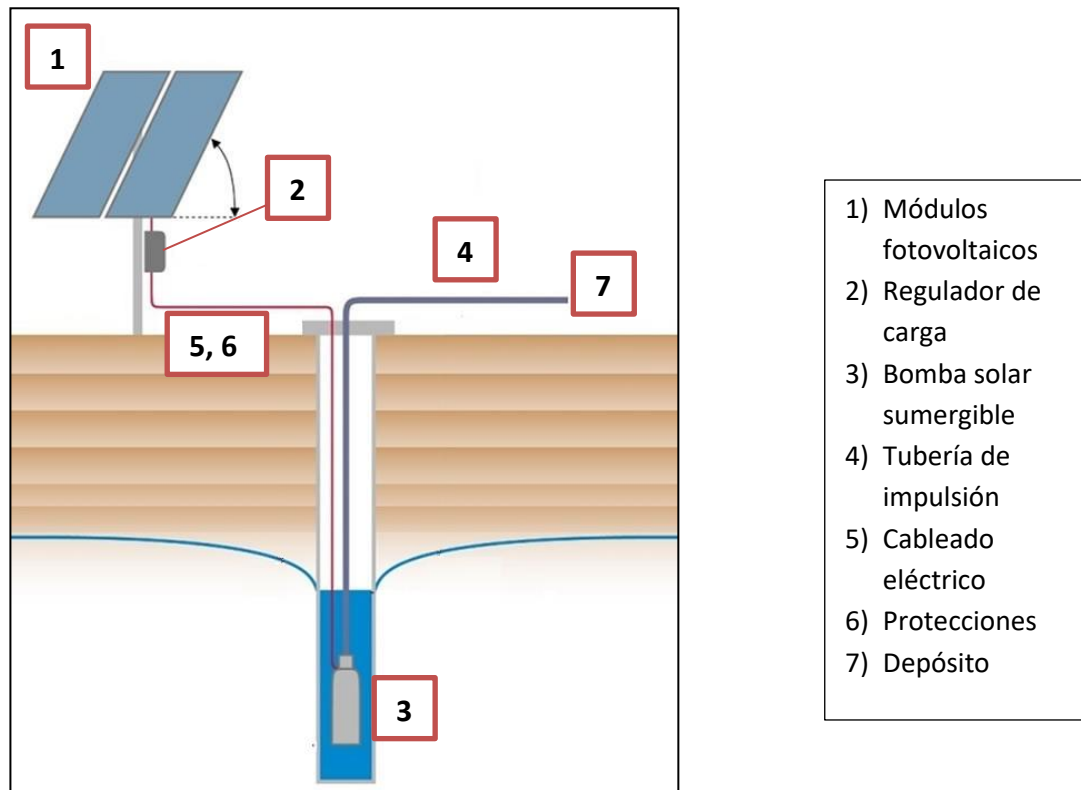
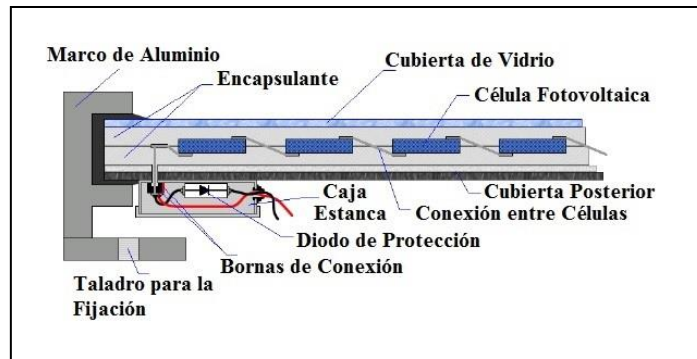


Figura 4 – Arquitectura de un sistema de bombeo fotovoltaico

### 1) Módulos fotovoltaicos

Son los encargados de captar la radiación solar y transformarla en electricidad generando corriente continua (DC) para alimentar la bomba. Dos factores importantes a determinar son el número de paneles y su disposición, dependiendo de la potencia que se necesita para suministrar a la bomba y la tensión nominal y intensidad de corriente necesaria para el accionamiento del motor eléctrico de la bomba.

Están formados por células solares dispuestas en serie y/o paralelo, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte, y capaces de ofrecer una tensión y una potencia que dependen de la superficie que mida la célula. Por lo tanto, la potencia que pueda ofrecer el conjunto de células que conforman el módulo, dependerá del número de células que posea.

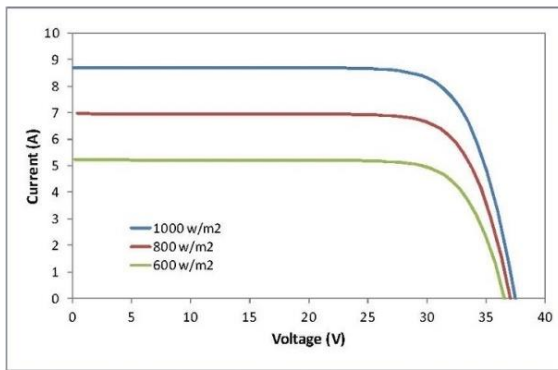


**Figura 5** – Componentes de un módulo fotovoltaico

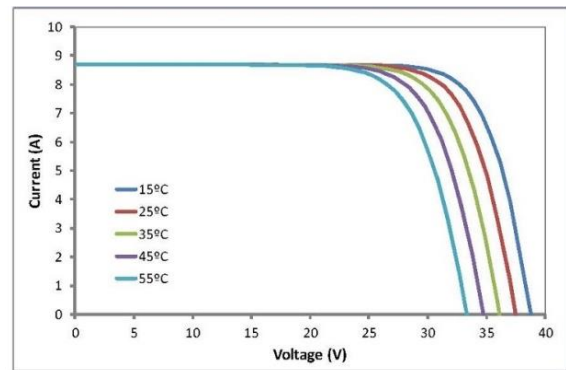
Los elementos que componen un módulo fotovoltaico son los siguientes:

- Cubierta de vidrio: superficie exterior de vidrio templado de 3 o 4mm de espesor y con una textura de modo que mejore el rendimiento cuando el ángulo de incidencia sea bajo.
- Encapsulante: relleno interior de vinilo de acetato etileno (EVA) con el objetivo de recubrir las células fotovoltaicas y protegerlas de la humedad, evitando que se produzca la oxidación del silicio de las células.
- Cubierta posterior: generalmente, realizada a base de fluoruro de polivinilo (PVF), que ofrece grandes propiedades aislantes dieléctricas, resistencia a la radiación ultravioleta y protección frente la humedad.
- Conexión entre células: elementos de conexión para establecer el circuito eléctrico.
- Caja estanca: caja formada de bornes de conexión y con grado de protección de donde parte el cableado exterior del módulo. Se incluyen también los diodos de protección que reducen la posibilidad de pérdida de energía originada por un mal funcionamiento por sombreados parciales.
- Marco estructural (generalmente de aluminio): soporte del conjunto que ofrece dos tipos de resistencias: mecánica y a agresiones meteorológicas especificadas por el fabricante.

El funcionamiento de un módulo fotovoltaico viene determinado por el valor de corriente generado y la tensión que ofrece en función de la temperatura. Como se observa en las figuras 5 y 6, el corriente generado crece con la intensidad y paralelamente, la tensión cae mientras aumenta la temperatura alcanzada en las células, es decir, la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico, normalmente superior a la temperatura ambiente.

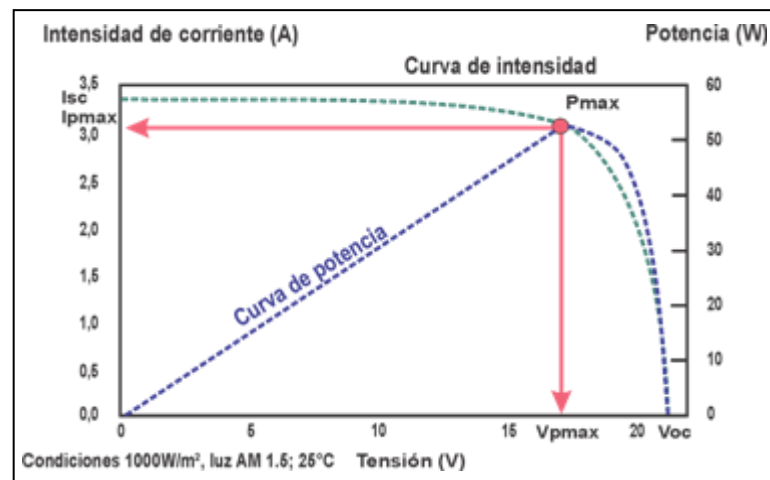


**Figura 6** – Curvas I-V para distintos valores de la irradiancia solar. Temperatura constante de la célula (25°C)



**Figura 7** - Curvas I-V para distintas temperaturas de la célula. Valor de irradiancia solar constante (1000W/m<sup>2</sup>)

El producto de la intensidad de corriente que genera un módulo fotovoltaico y la tensión, marcará la potencia eléctrica generada por el módulo. La potencia por lo tanto, es función de la radiación solar, la temperatura de las células del módulo y de la carga eléctrica que alimente.



**Figura 8** - Curva de intensidad-tensión de un módulo fotovoltaico (línea discontinua verde) y potencia generada por el módulo (línea discontinua azul) para una situación de trabajo en condiciones estándar. Se observa que en el rango de la tensión de máxima potencia, el módulo fotovoltaico obtendrá un mejor rendimiento.

La información técnica del módulo, proporcionada por el fabricante, debe de contener las siguientes características del módulo:

- Potencia nominal o pico ( $P_{max}$ ): Valor máximo de potencia que puede obtener el panel.
- Tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ): Valor máximo de voltaje cuando la intensidad de corriente es nula.
- Intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): Valor máximo de intensidad cuando la tensión de salida es nula.

- Tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{pmax}$ ): Valor de la tensión en el punto de máxima potencia.
- Intensidad de corriente máxima ( $I_{pmax}$ ): Valor de la corriente en el punto de máxima potencia.

## 2) Regulador de carga

El regulador de carga es un dispositivo electrónico encargado de controlar el funcionamiento óptimo de la bomba de agua, es decir, el encargado de dirigir y controlar la cantidad de energía que discurre desde los módulos fotovoltaicos hasta la bomba de agua evitando que se produzcan sobrecargas, limitando la tensión de alimentación de la bomba para su correcto funcionamiento y ayudando a maximizar el rendimiento energético de los paneles solares.

Se puede hacer la semejanza a un interruptor que está conectado para el proceso de alimentación de la bomba y desconectado cuando los niveles de tensión o intensidad de corriente no son los adecuados para alimentar al motor de la bomba o el nivel del agua en el pozo es inferior que el nivel límite de seguridad establecido para evitar que la boca de aspiración de la bomba quede descubierta.

Se dimensiona para que sea capaz de interrumpir el suministro de electricidad si hay una falta de irradiación solar (el voltaje en los terminales de alimentación del motor entonces, será inferior a su valor de tensión mínima) y para resistir sin daños unos valores de tensión nominal e intensidad máxima de corriente generada en el sistema, tanto en la línea de entrada al regulador como en la línea de salida hacia las cargas que alimenta: en la línea de entrada al regulador, la corriente máxima es la correspondiente a la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) más un margen de seguridad; por otro lado, la corriente por la línea de salida del generador viene determinada por el consumo, en este caso, del motor eléctrico de la bomba ( $I_{salida}$ ).

## 3) Bomba solar sumergible

Una bomba solar sumergible es un dispositivo, con una capacidad de aspersión muy elevada, preparado para sacar o mover agua de un pozo de sondeo a una gran altura. Disponen de un motor eléctrico de corriente continua (DC) y suelen ser fabricadas en acero inoxidable para soportar mejor la agresividad de las aguas subterráneas.

Al estar inmersas en pozos de agua, es necesaria la instalación de sondas de nivel de agua para evitar que el nivel del agua pueda descender durante el bombeo por debajo de la boca de aspiración de la bomba. El valor de la inmersión mínima en el agua se determinará con la siguiente ecuación:

$$\text{Inmersión mínima}[m] = NPSH_{bomba} - 10 \quad (1)$$

La bomba debe trabajar cerca de su máximo rendimiento. Ésta información aparece en la curva de funcionamiento,  $H_b(Q)$ , que facilita el fabricante. El punto de funcionamiento es el que tiene un caudal lo más próximo posible al punto de rendimiento óptimo, o bien, ligeramente a la derecha para evitar la cavitación.

Un aspecto a tener en cuenta al ser una bomba sumergible es el diámetro de ésta que por consecuencia, queda limitado por la anchura del pozo donde se sumerja. El espacio libre que queda entre la pared del pozo y la carcasa de la bomba influenciara en el rendimiento de la bomba, así que se debe respetar una distancia lateral mínima para asegurar una refrigeración eficiente del motor de la bomba que absorba el calor que se genera durante su funcionamiento. Esta distancia mínima,  $D$ , se puede determinar con la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 354}{v} + d^2} \quad (2)$$

Donde,

$v$  es la velocidad del agua en el hueco existente alrededor de la bomba, en [m/s]. Para evitar que se produzcan grandes pérdidas de carga por fricción se debe limitar a 3 m/s.

$d$  es el diámetro exterior de la bomba, en [m].

#### 4) Tubería de impulsión

La tubería de impulsión es la que conecta la bomba sumergible con el depósito de agua dónde se almacenará el agua impulsada. Ésta tubería estará condicionada por el diámetro de salida de la bomba que varía según el modelo de bomba seleccionado.

El dimensionado y elección de esta tubería depende de varios factores: la presión de descarga, la profundidad de la instalación, el nivel de agresividad del agua subterránea, las pérdidas de carga por fricción, etc.








El material mayoritariamente utilizado en este tipo de tuberías es el acero inoxidable, para la agresividad de la mayoría de aguas subterráneas o mangueras de tipo flexibles, que son una opción más económica. Estas son mangueras fabricadas de poliéster de alta resistencia, tejidas circularmente sin costuras y extorsionadas interior y exteriormente mediante poliuretano elastómero o caucho sintético. Nos aporta diferentes ventajas reducir la pérdida de carga por fricción al aumentar su diámetro de paso cuando se encuentren bajo presión. Si la agresividad fuera elevada, es recomendable instalar ánodos de zinc para proteger el motor y la bomba.

#### 5) Cableado eléctrico

La instalación del sistema fotovoltaico queda permanente al aire libre, por esa razón, debe de estar diseñada para resistir inclemencias meteorológicas, que condicionan los materiales empleados en ella. En cuanto al cableado eléctrico de la instalación, se debe de diferenciar el que conecta los módulos fotovoltaicos con el regulador y el que alimenta al motor eléctrico de la bomba sumergible.

Para el uso específico en instalaciones fotovoltaicas, se recomienda emplear cables del tipo PV ZZ-F. Estos cables unipolares con doble aislamiento tienen la capacidad de transportar corriente continua hasta 1800V de manera eficiente, tienen una gran resistencia térmica, al fuego y climática (rayos UV, frío, humedad...).

Los materiales empleados para el aislamiento y la cubierta de este tipo de cables son reticulados, de altas resistencias mecánicas y resistentes a la abrasión, flexibles y libres de halógenos, mientras que el conductor interior es estañado para adquirir una mayor resistencia a la corrosión por oxidación.

 Conductor flexible, clase 5/6	 Temperatura máxima del conductor: 120°C	 Temperatura máxima en cortocircuito: 250°C (máximo 5 s)	 Radio de curvatura: 3 x diámetro exterior	 Marcaje: metro a metro	 No propagación de la llama
 Resistencia a los impactos: AG2. Impacto medio	 Instalación al aire libre: permanente	 Resistencia al agua: AD7 inmersión	 Resistencia a los ataques químicos: excelente	 Resistencia a las temperaturas ambientales extremas: excelente	 Vida útil 30 años.
 Resistente a los rayos ultravioletas	 Resistencia a grasas y aceites: excelente	 Resistencia a la abrasión	 Instalaciones solares fotovoltaicas	 Intemperie	

**Figura 9** – Características de los cables flexibles tipo PV ZZ-F

## 6) Protecciones

En ocasiones existen incidentes que pueden dañar los equipos conectados de la instalación o incluso las personas. Para detectarlos y eliminarlos existen protecciones necesarias a instalar:

### - Protección contra sobrecargas:

Cuando existe un valor excesivo de intensidad ocasionado por un defecto de aislamiento, avería o una demanda excesiva de carga, en los cables se genera un calentamiento excesivo y provoca un daño prematuro reduciendo su vida útil que puede terminar ocasionando un cortocircuito en la instalación.

La solución más común para este tipo de problema es la instalación de un fusible. Los fusibles son fundamentalmente una tira metálica insertada en el circuito de corriente que al rebasarse cierta intensidad se funde, provocando la desconexión y protegiendo así al circuito. La intensidad nominal de un fusible es el valor de la intensidad de corriente continua que puede soportar indefinidamente y como criterio general, un fusible es capaz de despejar una falta de intensidad 5 veces la nominal en un tiempo de 0,1s.

Para la correcta elección del fusible se debe de tener en cuenta los siguientes factores:

- La tensión nominal del fusible debe ser mayor o igual que la tensión de operación de la línea donde se instale.
- La intensidad nominal del fusible deberá ser mayor o igual que la máxima corriente esperada en la línea donde se instale.
- La intensidad de actuación o ruptura del fusible actuará en un tiempo inferior a 0,1s.

- La intensidad de cortocircuito máxima que pueda soportar el fusible deberá ser mayor que la máxima intensidad de cortocircuito esperada en el punto de la línea donde se instale el fusible.

- *Protección contra cortocircuitos:*

Una conexión incorrecta o un defecto de aislamiento pueden provocar un cortocircuito. Para que la protección sea eficaz, debe cumplir que el tiempo de corte de toda corriente de cortocircuito que se produzca en un punto cualquiera de la instalación, no debe ser superior al tiempo que los conductores tardan en alcanzar su temperatura límite admisible.

- *Protección contra sobretensiones:*

Generalmente, una sobretensión es provocada por las descargas atmosféricas (rayos) que se realizan sobre las partes altas de la estructura metálica que soporta los paneles.

La protección contra estos fenómenos son unos descargadores de corriente que ofrecen una resistencia de tipo inversa, cuyo valor disminuye al aumentar la tensión que se aplica sobre ella, más comúnmente llamados pararrayos. Éstos deben colocarse lo más cerca posible del equipo a proteger para que absorba las sobretensiones que puedan producir en la instalación y evitando así la perforación de los aislamientos.

### **3. Dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico**

El dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico se puede realizar mediante diferentes métodos. El expuesto a continuación se basa en cálculos sobre los valores mensuales medios de la radiación solar disponible y energía hidráulica necesaria. La instalación será dimensionada cogiendo de referencia el mes el cual la demanda de agua es mayor en relación con la energía solar disponible, para poder así asegurar el buen funcionamiento y excedente de agua durante todo el año.

Para un buen dimensionado, es necesario seguir unos pasos, que por general se resumen en la evaluación de energía hidráulica necesaria para satisfacer la demanda, análisis del recurso fotovoltaico y definición de los equipos necesarios. El procedimiento para el dimensionado en este proyecto, junto a las expresiones utilizadas, se realizará por medio de los recursos expuestos en la *“Guía para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica, Sandia National Laboratories, Southwest Technology Development Institute (NMSU/SWTDI)”*

A continuación se expone cómo diseñar un sistema de generación solar fotovoltaica que sirva para suministrar electricidad a una bomba de agua para el riego de un terreno de cultivo:

#### **3.1 Necesidades hidráulicas**

Las necesidades hidráulicas es la demanda de agua para el consumo humano, animales domésticos o el riego de cultivos. Para seleccionar el sistema adecuado se debe conocer el caudal medio diario o mensual para determinar los requerimientos hidráulicos del equipo de bombeo.

Si se dispone del consumo mensual de la instalación y las horas en las que el bombeo debe de funcionar, puede calcularse el caudal medio mensual  $Q_i$ , en  $\text{m}^3/\text{h}$ , para todos los meses del año:

$$Q_i = \frac{V_i}{t} \quad (3)$$

Donde

$i$  serán los meses del año, de enero a diciembre.

$V_i$  es la demanda de volumen hidráulico mensual, en  $[\text{m}^3]$ .

$t$  es el tiempo en el que el que la instalación de bombeo fotovoltaico esté en funcionamiento, en  $[\text{h}]$ .

#### **3.2 Radiación solar disponible - HSP**

Para el correcto dimensionado de un sistema fotovoltaico es necesario conocer la radiación solar mensual media del lugar donde se desee realizar la instalación. La hora solar pico (HPS) es la unidad que mide la irradiación solar media de un determinado emplazamiento



y se define como el tiempo en horas de una hipotética irradiación solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup>, es decir, la cantidad de energía solar que recibe un metro cuadrado de superficie en las horas en que los módulos fotovoltaicos captan la energía solar suficiente para alimentar el sistema eléctrico. Depende de la latitud de la ubicación, el mes en el que se esté evaluando y del ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico. Este último se cuantifica mediante un factor de corrección  $k$ , que en caso de que la superficie sea plana tendrá un valor de 1

La cantidad de radiación solar que incidirá sobre una superficie perpendicular a los rayos solares dependerá exclusivamente de la energía procedente del Sol y de la distancia entre el Sol y la Tierra, variable a lo largo del año. Existe una disminución de la radiación solar que incide al nivel del suelo debida a la absorción de los rayos solares por parte de la atmosfera terrestre, a las condiciones atmosféricas, en especial a la nubosidad, y de la orientación de la superficie en relación al Sol.

La determinación de radiación solar incidente sobre una superficie inclinada media mensual puede obtenerse analíticamente o gracias a la multitud de bases de datos donde ofrecen esta información para cualquier lugar del planeta, como por ejemplo:

- *PVGIS, Photovoltaic Geographical Information System*
- *OpensolarDB – Datos mundiales de Radiación*

El método analítico se basa en el promedio de la suma de las radiaciones diarias de cada mes para determinar la cantidad de radiación solar incidente sobre una superficie ( $I_{OT}$ ):

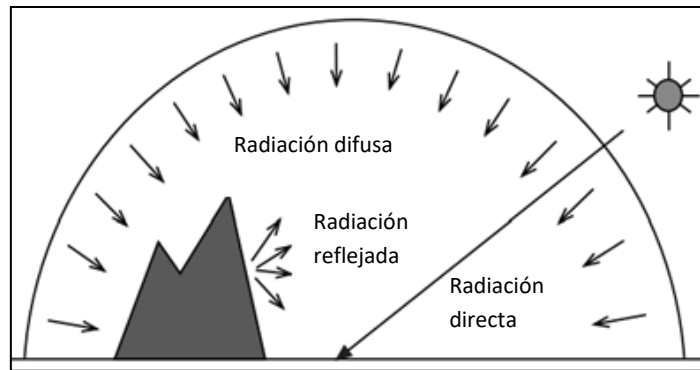
$$I_{OT} = I_{BT} + I_{DOT} + I_{RT} \quad (4)$$

Donde

$I_{BT}$  es la radiación directa, en [kWh]. Ésta proviene directamente del Sol, llega a la superficie sin ningún cambio de dirección y depende de los ángulos de incidencia de los rayos solares sobre la superficie a considerar

$I_{DOT}$  es la radiación difusa, en [kWh]. Ésta incide sobre la superficie como consecuencia de las reflexiones y refracciones de la radiación directa en la atmosfera. Depende de distribución de la relación entre la radiación absorbida por una superficie inclinada y una superficie horizontal. Esta distribución es aleatoria, ya que depende de las características de transitividad de la atmosfera, variables, tanto en tiempo como en espacio, en función de la nubosidad, contaminación atmosférica...

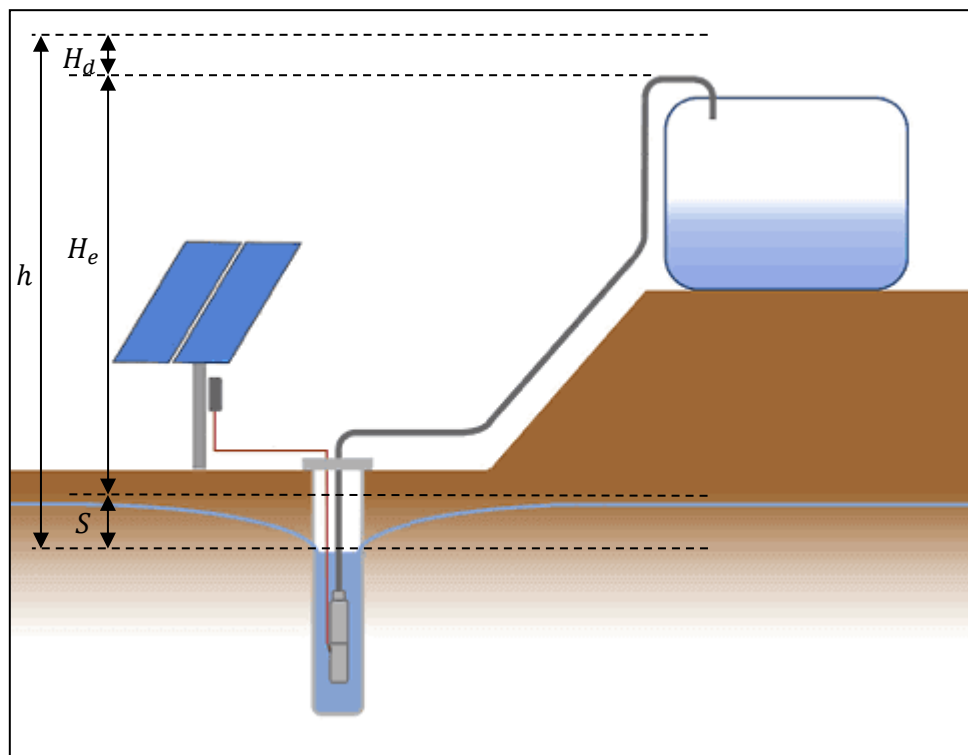
$I_{RT}$  es la radiación reflejada, en [kWh]. Procede de la reflexión de la radiación sobre la tierra, edificios y otros elementos del entorno. En caso de que la superficie sea horizontal, no hay ningún componente reflejado y esta radiación es nula.



**Figura 10** – Representación de los tres tipos de radiación que intervienen en la cantidad de radiación solar incidente sobre una superficie.

### 3.3 Altura hidráulica de bombeo

La altura hidráulica total de bombeo,  $h$ , es la presión efectiva que debe vencer la bomba para satisfacer las necesidades hidráulicas y se calcula mediante la siguiente expresión:



**Figura 11** – Componentes de la altura hidráulica de bombeo

$$h = H_e + H_d + S \quad (5)$$

Donde

$H_e$  es la altura estática, en [m].

$H_d$  es la altura dinámica, en [m].

$S$  es el abatimiento del pozo, en [m].

### Altura estática

La altura estática o dinámica  $H_e$  corresponde a la diferencia de niveles entre la altura de la capa freática y la cota piezométrica superior, es decir, el punto más elevado de la instalación donde debe de bombearse el agua.

### Altura dinámica

La altura dinámica  $H_d$  es el resultado de la caída de presión que debe superar un sistema de bombeo para lograr que el líquido fluya totalmente en el sistema venciendo las resistencias de la instalación. Esta resistencia o pérdidas por fricción, se pueden distinguir entre continuas o singulares y la altura dinámica será determinada por el sumatorio de éstas.

Las pérdidas de carga continuas,  $h_c$ , dependen de la longitud, diámetro, rugosidad de la superficie interior de la tubería, velocidad del fluido y del coeficiente de fricción  $f$ , el cual depende de las características de la corriente (régimen laminar o turbulento). Se puede estimar mediante la expresión de Darcy-Weisbach:

$$h_c = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

$$\rightarrow \begin{cases} v = Q/S \\ Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \end{cases} \quad (7)$$

$$\rightarrow \begin{cases} f = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{si el régimen es laminar } (Re \leq 2300) \\ \frac{1.325}{\ln^2 \left( \frac{\epsilon}{3.71 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)} & \text{si el régimen es turbulento } (Re > 2300) \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Donde

$h_f$  son las pérdidas de carga continuas, en [m].

$f$  es el coeficiente de fricción.

$L$  es la longitud de la tubería, en [m].

$D$  es el diámetro de la tubería, en [m].

$v$  es la velocidad del fluido, en [m/s].

$Re$  es el número de Reynolds<sup>1</sup>.

$S$  es la sección de la tubería, en [m].

$\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido<sup>2</sup>, en [m<sup>2</sup>/s].

$\epsilon$  es la rugosidad<sup>3</sup>, en [m]

<sup>1</sup> Valor adimensional que representa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido. Su valor es un indicador de la naturaleza del flujo: laminar ( $Re \leq 2300$ ), transicional ( $2300 < Re < 4000$ ) o turbulento ( $Re \geq 4000$ ). Con el objetivo de simplificar los cálculos se consideran solamente dos tipos de flujo (laminar y turbulento) siguiendo las condiciones especificadas en las expresiones (20) y (21)

<sup>2</sup> Medida de la resistencia del fluido a derramarse o fluir por el interior de un conducto teniendo en cuenta la densidad de éste.

<sup>3</sup> Conjunto de irregularidades que posee la superficie interior de la tubería, variable para cada tipo de material.

En el caso de que los diámetros de la tubería o velocidades del fluido en el sistema fueran variables, las pérdidas de carga se calcularían realizando un sumatorio de la expresión (17) para los diferentes valores de los diámetros o velocidades.

Las pérdidas de carga singulares,  $h_s$ , aparecen en el caso de que en el sistema existan accesorios como válvulas, codos, reducciones, grifos... y pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante el coeficiente de pérdidas singulares,  $K$ , y la velocidad media en el interior de la tubería:

$$h_s = \sum K_i \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

El coeficiente  $K$  es empírico, adimensional y depende del tipo de singularidad del accesorio resumido en la siguiente tabla:

**Tabla 1** - Valores del coeficiente de pérdidas singulares  $K$  para diversos accesorios (Agüera, J. "Mecánica de Fluidos" 2002)

Accesorio	Valor de K
Válvula esférica, totalmente abierta	10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de retención de charnela	2,5
Válvula de pie con colador	0,8
Válvula de compuerta, totalmente abierta	0,19
Codo de retroceso (codo en U)	2,2
Empalme en T normal	1,8
Codo de 90º normal	0,9
Codo de 90º de radio medio	0,75
Codo de 90º de radio grande	0,6
Codo de 45º	0,42

Así pues, la altura dinámica estará determinada por la siguiente expresión:

$$H_d = h_c + h_s \quad (12)$$

### Abatimiento del pozo

El abatimiento del pozo es la diferencia de niveles entre la capa freática y el nivel de agua del pozo.

La altura del pozo varía dependiendo de las condiciones meteorológicas, por es importante conocer el nivel del agua en los momentos de abundancia (etapas lluviosas) y en los de escasez (sequía), es decir, se debe determinar correctamente las fluctuaciones de la capa freática a lo largo del año. La altura estática que se usará para dimensionar la instalación será la máxima, para asegurar el correcto funcionamiento durante todo el año.

### **3.4 Mes de dimensionado y requerimientos del equipo de bombeo de agua**

La instalación se debe dimensionar con los datos de demanda hidráulica más elevada y su correspondiente radiación solar a la inclinación óptima para poder satisfacer energéticamente la alimentación de la bomba. Para ello, se debe calcular el coeficiente entre caudal medio mensual y las radiaciones de cada mes para diferentes inclinaciones,  $\frac{Q_i}{I_{OT,i}}$ , suponiendo la superficie orientada hacia el sud.

Posteriormente, el valor mínimo entre los máximos de dicho mes, contendrá los datos hidráulicos y energéticos utilizados como base para dimensionar los componentes del sistema: demanda hidráulica más elevada y radiación máxima de ese mes para diferentes inclinaciones, por lo tanto, también obtendremos la inclinación óptima del módulo.

Para hallar estos datos se creará una matriz  $M_{ixj} = M_{12 \times 10}$  de  $i$  filas, correspondientes a los 12 meses del año, y  $j$  columnas, correspondientes al grado de inclinación del generador fotovoltaico de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , evaluándola cada 10 grados. Los componentes  $m_{ij}$  de esta matriz serán los coeficientes entre el caudal medio mensual y la inclinación óptima del generador,  $\frac{Q_i}{I_{OT,i}}$ . Los datos deseados son los correspondientes al caudal, radiación solar, inclinación y mes de la componente de la matriz que cumpla el valor “ $\min ( \max (m_{ij}))$ ”.

Cuando se disponga del caudal medio en el mes de dimensionamiento y la altura de bombeo, puede seleccionarse la bomba que mejor se adapte a los requerimientos anteriores de diseño analizando los datos técnicos facilitados por el fabricante.

### **3.5 Consumo energético estimado de la bomba**

La potencia hidráulica suministrada por la bomba,  $P_{teorica}$  en [kW], es la potencia transmitida por la bomba al líquido bombeado.

Por otra parte, la potencia absorbida por la bomba,  $P_{real}$  en [kW], es la consumida por la bomba en un punto de trabajo, es decir, la potencia que deben de suministrar los paneles fotovoltaicos para abastecer la demanda energética y puede hallarse mediante la siguiente expresión:

$$P_{teorica} = \frac{Q \cdot h \cdot \rho}{367} \quad (13)$$

$$P_{real} = \frac{P_{teorica}}{\eta} \quad (14)$$

Donde

$Q$  es el caudal de agua, en [m<sup>3</sup>/h].

$h$  es la altura hidráulica de bombeo, en [m].

$\rho$  es la densidad del fluido a bombear, en [kg/dm<sup>3</sup>].

$\eta$  es el rendimiento de la bomba, incluyendo el efecto de los distintos rendimientos que lo componen (volumétrico, hidráulico y mecánico).

367 es una constante de conversión

Dependiendo del número de horas de funcionamiento medio de la bomba, se puede obtener el consumo energético estimado,  $C_e$  en [kWh], de la bomba:

$$C_e = P_{real} \cdot t \quad (15)$$

Donde

$t$  es tiempo de funcionamiento medio de la bomba, en [h].

### 3.6 Número y disposición de los módulos fotovoltaicos

Para conocer el número de módulos fotovoltaicos necesarios y su disposición, previamente, se debe elegir un modelo de paneles fotovoltaicos para conocer sus características técnicas facilitadas por el fabricante:

- $P_{MP}$  es la potencia pico del módulo seleccionado, en [W].
- $K_T$  es el coeficiente de temperatura, en [°C<sup>-1</sup>]. Generalmente, este valor viene dado por el fabricante, aunque si éste no lo proporciona, se puede tomar por defecto el valor de 0,0035 °C<sup>-1</sup>.
- $T_{onc}$  es la temperatura de operación nominal de la célula, en [°C].
- $V_{pmax}$  es la tensión en el punto de máxima potencia del módulo seleccionado, en [V].
- $I_{SC}$  es el valor máximo de intensidad cuando la tensión de salida es nula, en [A].

El número de paneles vendrá determinado por la demanda energética de la bomba para satisfacer las necesidades, es decir, por el consumo eléctrico  $C_e$ , y se puede determinar con la siguiente expresión:

$$N_{mód} = \frac{C_e}{P_{MP} \cdot HSP_{crit} \cdot (1 - PR)} \quad (16)$$

Donde

$PR$  es el coeficiente del rendimiento energético de los módulos o eficiencia de la instalación en condiciones reales de trabajo, en [%]

El coeficiente  $PR$  es el sumatorio de diferentes pérdidas de eficiencias originadas en la instalación por:

- Dispersión de potencia de los módulos: facilitada por el fabricante cómo el porcentaje de la tolerancia de potencia del módulo.
- Incremento de temperatura de las células fotovoltaicas: que puede calcularse con la siguiente expresión:

$$PR_T = K_T \cdot (T_c - 25) \quad (17)$$

$$\rightarrow T_c = T_{amb} + (T_{onc} - 20) \cdot \frac{E_i}{800} \quad (18)$$

Donde

$T_c$  es la temperatura media mensual a la que trabajan las placas fotovoltaicas, en [°C].

$T_{amb}$  es la temperatura ambiente media mensual, en [°C].

$E_i$  es la radiación media del mes de dimensionamiento, en [W/m<sup>2</sup>].

- Acumulación de suciedad en los módulos: en unas condiciones normales de emplazamiento y realizando un correcto mantenimiento y limpieza de forma regular, los paneles fotovoltaicos no deben superar unas pérdidas por este concepto del 3%.
- Sombras: las pérdidas por sombreado parcial que penalizan su producción eléctrica pueden estimarse en torno al 2%.
- Degradación de los módulos: estas pérdidas se deben a un proceso natural de degradación de todas las células de silicio debido a su exposición a la radiación solar, que de forma usual se admite que sean del orden del 1%.
- Eléctricas: pueden estimarse al 1,5%.
- Reflectancia: estas pérdidas hacen referencia a los efectos angulares de la reflexión en los módulos y están estimados en un 2,9%.

Cuando se disponga del número de módulos necesarios para abastecer la demanda hidráulica de la instalación es necesario establecer la conexión entre módulos: en serie o paralelo. Puede conocerse mediante las siguientes expresiones:

$$N_{serie} = \frac{V_{N,b}}{V_{pmax}} \quad (19)$$

$$N_{paralelo} = \frac{N_{mód}}{N_{serie}} \quad (20)$$

Donde

$V_{N,b}$  es la tensión nominal de trabajo del motor eléctrico de la bomba, en [V].

### 3.7 Regulador

Para la selección del regulador de carga es necesario calcular la máxima corriente que deberá soportar, tanto en la entrada como en la salida de él.

#### Entrada

La máxima corriente de entrada proviene directamente de los módulos fotovoltaicos, y puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$I_{R,e} = 1,25 \cdot I_{SC} \cdot N_{paralelo} \quad (21)$$

### Salida

Por otro lado, para la máxima corriente esperada a la salida del regulador, es decir, del lado de la instalación que alimenta a la bomba de agua, es utiliza:

$$I_{R,s} = \frac{1,5 \cdot P_{DC}}{V_B} \quad (22)$$

Donde

$P_{DC}$  es la potencia de las cargas que haya que alimentar, es decir, la potencia nominal de la bomba, en [W].

$V_B$  es la tensión nominal de la bomba, en [V].

1,5 es un factor de seguridad para tener en cuenta los picos de corriente que puedan producirse en el arranque de la bomba.

Para la elección del regulador, en primer lugar, se debe comprobar que sus especificaciones técnicas se adecuen a la máxima corriente de entrada y salida que soportará. Finalmente, debe comprobarse que los parámetros de diseño del modelo de regulador seleccionado se ajusta a las condiciones de operación previstas: la tensión de entrada al regulador y la tensión máxima en circuito abierto admitida por el regulador, que dependerá de la disposición de los módulos.

## **3.8 Cableado eléctrico**

Como se ha descrito en el apartado 2.3, los cables recomendados para el uso específico en instalaciones fotovoltaicas son del tipo PV ZZ-F dadas sus características y resistencia frente a las inclemencias meteorológicas. Para el cálculo de la sección de los conductores y protecciones del sistema, se empleará el procedimiento expuesto por *SunFields-Solar*, proveedor de placas solares y equipamiento fotovoltaico.

Los tramos de cables, que trabajan en corriente continua, estarán compuestos de dos conductores activos (positivo y negativo) más el conductor de protección.

Para el cálculo de la sección (S) de los conductores, se emplea la siguiente formulación:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\Delta U \cdot K} \quad (23)$$

Donde

L es la longitud del tramo, en [mm<sup>2</sup>]

I es la intensidad de corriente que circula por el conductor, en amperios [A]

$\Delta U$  es la caída de tensión máxima permitida, en voltios (V)

K es la conductividad del conductor del cable



**Tabla 2** – Valores para el cálculo de la sección de los conductores en cables del tipo PV ZZ-F

Porcentajes de caída de tensión		
Tramo	Máxima [%]	Recomendada [%]
Módulos-Regulador	3	1
Regulador – Bomba sumergible	5	3
Valores de conductividad		
Material	K	
Cobre	56	
Aluminio 35	35	

En el segundo tramo, el cable que alimenta al motor eléctrico de la bomba, siempre se usa la intensidad de corriente que circula por el cable a plena carga de la bomba (valor que facilita el fabricante). También se tiene que tener en cuenta que la longitud máxima del cable será tal que la caída de tensión máxima que se produzca en el no exceda el recomendado según la tabla anterior.

### 3.9 Protecciones

Para la protección y seguridad de la instalación habrá que instalar un cable de protección que servirá para conectar todas las masas metálicas de la instalación con el sistema de tierra, para evitar que aparezcan diferencias de potencial peligrosas. Al mismo tiempo, éste permitirá descargar a tierra las corrientes de defectos o descargas de origen atmosférico. El material seleccionado será el mismo que en los conductores activos y su sección debe tener el conductor de protección en función de la sección de los conductores activos.

La selección del cableado de protección se realizará siguiendo esta tabla:

**Tabla 3** – Relación entre los conductores de protección y activos

Sección de los conductores activos de la instalación, $S$ [mm <sup>2</sup> ]	Sección mínima de los conductores de protección, $S_p$ [mm <sup>2</sup> ]
$S \leq 16$	$S_p = S$
$16 < S \leq 35$	$S_p = 16$
$S > 35$	$S_p = S/2$

Adicionalmente al conductor de protección, se emplearán fusibles para la protección contra sobre intensidades originadas por sobrecargas o cortocircuitos. Para la elección de un fusible efectivo, se debe cumplir la siguiente condición:

$$I_b \leq I_n \leq 0,9 \cdot I_{adm} \quad (24)$$

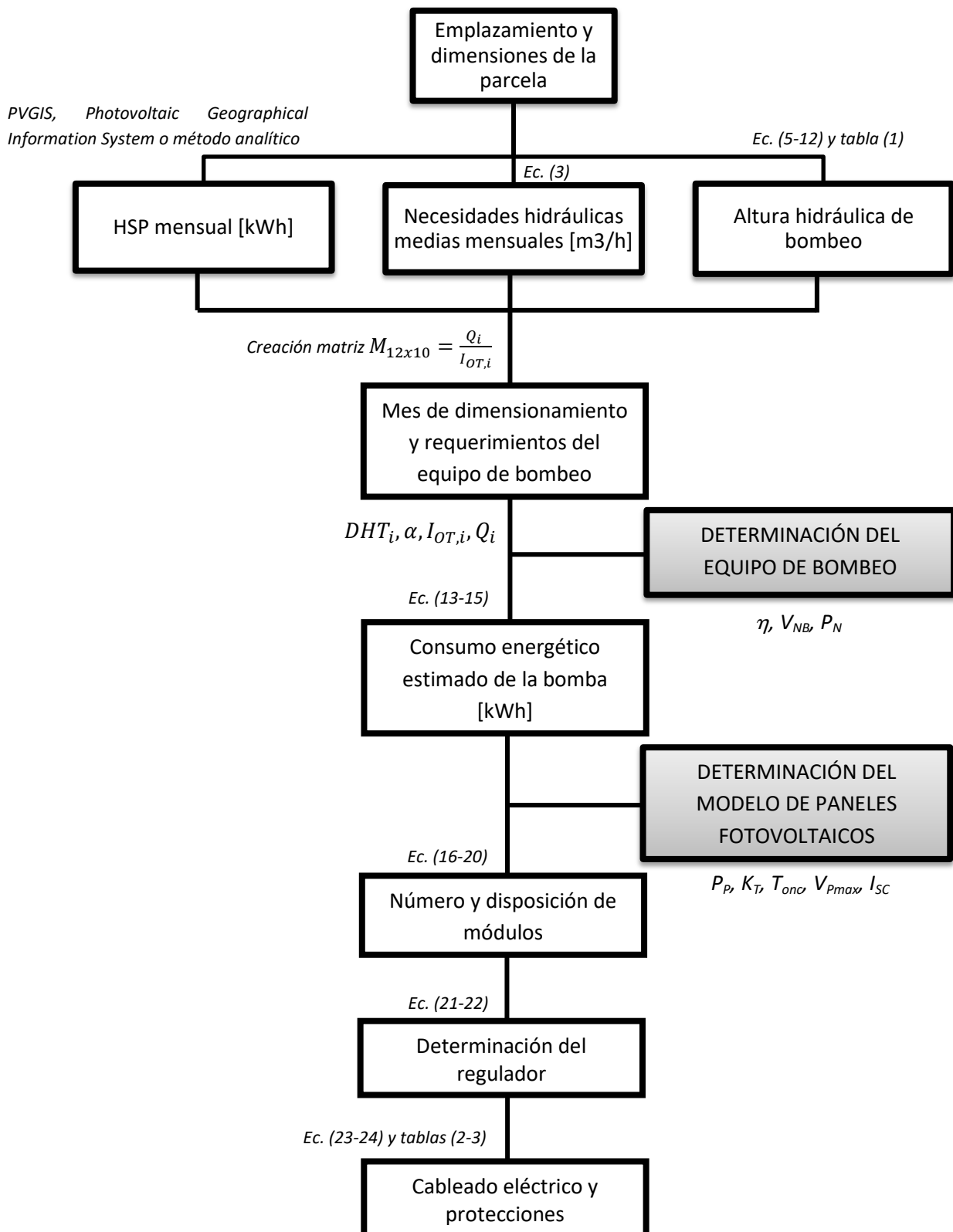
Donde

$I_b$  es la intensidad de corriente que recorre la línea, en [A].

$I_n$  es la intensidad nominal del fusible asignado a la línea.

$I_{adm}$  es la máxima intensidad admisible del cable conductor de la línea.

### 3.10 Organigrama para el dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico



## 4. Ejemplo de dimensionamiento

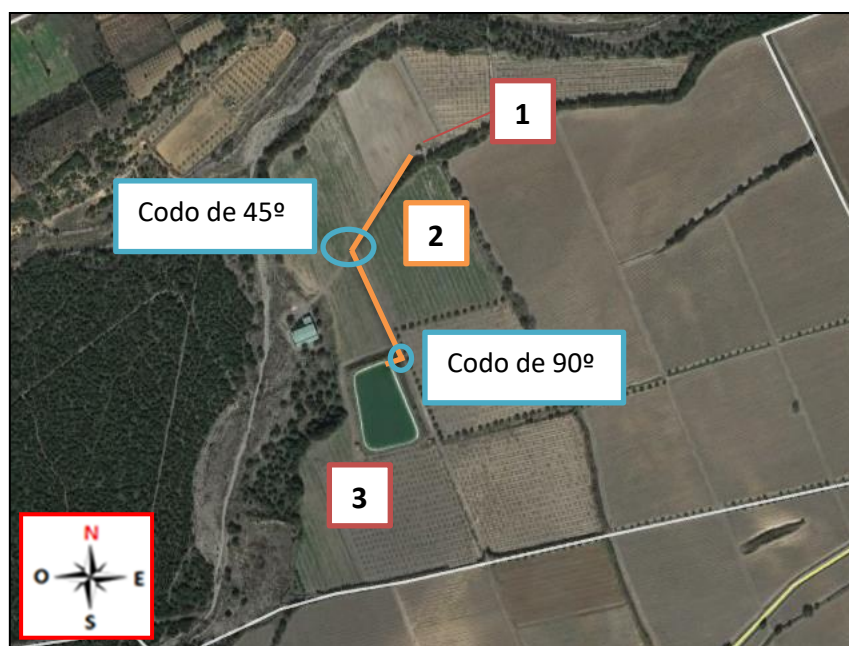
### 4.1 Situación actual

La parcela donde se proyecta dimensionar la instalación solar fotovoltaica autónoma para el bombeo directo de agua está dedicada al cultivo del avellano y nogal principalmente y secundariamente al viñedo, olivar, almendro y frutales. Se ubica en el Polígono 36 parcela 187, 43448 Vimbodí i Poblet (Tarragona, Cataluña), y tiene clasificación de suelo rústico.



**Figura 12** – Parcela donde se hará la instalación solar fotovoltaica para el bombeo directo de agua de riego con referencia catastral 43178A036001870000OP y coordenadas decimales: latitud – 41,378932138364º y longitud – 1,0659872597919957º.

Vimbodí i Poblet está situado en el sud-oeste de la comarca de la Conca de Barberà, en la provincia de Tarragona. El municipio está a una altura de 486 m y limita con las comarcas de Les Garrigues (Lleida) i el Baix Camp. El término municipal donde se ubica la parcela a dimensionar, tiene un total de 65,8 km<sup>2</sup> i se expande por las vertientes septentrionales de las montañas de Prades.



**Figura 13** – Distribución actual de la instalación actual

La parcela es totalmente regada por el sistema de goteo, existiendo una red de tuberías por sus 22 hectáreas, parte enterradas y parte aéreas, para conducir el agua. Ésta proviene de una gran balsa **(3)** de capacidad de 35.000 m<sup>3</sup> construida, parte excavada en el terreno y parte con espesos taludes de tierra revestida interiormente con láminas de caucho especial soldadas in situ, con lo que consigue una absoluta estanquidad.

El agua se obtiene de un pozo **(1)** cercano a la finca y el agua se transmite mediante una tubería de polietileno **(2)** instalada bajo tierra con las siguientes características:

**Tabla 4** – Dimensiones de la tubería de la instalación facilitadas por el propietario

<b>Material de la tubería</b>	Polietileno
<b>Longitud de la tubería [m]</b>	306,5
<b>Diámetro de la tubería [m]</b>	0,63
<b>Rugosidad de la tubería [mm]</b>	0,1
<b>Altura estática de la instalación [m]</b>	12
<b>Abatimiento del pozo [m]</b>	1

Tanto el caudal del agua como la balsa son sobradamente suficientes para las necesidades de la finca.

## 4.2 Dimensionado del bombeo fotovoltaico

Para la realización de los cálculos necesarios para el dimensionado, se utiliza el organigrama expuesto en el apartado (3.10) junto a la herramienta de software matemático Matlab, que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (tipo M). Se adjunta el código de programación para la obtención de resultados de cada apartado en el *apéndice 5.1*.

### 4.2.1 Necesidades hidráulicas

Inicialmente, debe conocerse la demanda hidráulica para el riego de cultivo de la instalación para el correcto dimensionamiento de la instalación. Los datos expuestos en la tabla 5 han sido obtenidos directamente del propietario de la parcela:

**Tabla 5** – Demanda hidráulica y caudal medio mensual para todo el año del terreno donde se proyecta la instalación.

Mes	Demanda hidráulica [m <sup>3</sup> /ha]	Demanda hidráulica total [m <sup>3</sup> ]	Caudal medio [m <sup>3</sup> /h]
ENERO	0	0	0
FEBRERO	258	5677	1,07
MARZO	430	9462	1,79
ABRIL	614	13517	2,56
MAYO	768	16896	3,20
JUNIO	960	21120	4,00
JULIO	1200	26400	5,00
AGOSTO	960	21120	4,00
SETIEMBRE	768	16896	3,20
OCTUBRE	614	13517	2,56
NOVIEMBRE	0	0	0
DICIEMBRE	0	0	0

### 4.1.1 Determinación de la radiación solar disponible

El estudio de la radiación media mensual en el emplazamiento de nuestra parcela debe de realizarse para diferentes grados de inclinación del módulo fotovoltaico y así, posteriormente, poder determinar cuál es el óptimo.

Como se ha expuesto en el apartado (3.2), existen varias opciones para obtener los resultados. En este dimensionamiento se han utilizado los datos de *PVGIS, Photovoltaic Geographical Information System* introduciendo las coordenadas decimales del emplazamiento de la parcela y los diferentes grados de inclinación del módulo con una desviación de 0º hacia el sud:

**Tabla 6** – Radiación solar media mensual, en [kWh/m<sup>2</sup>], para diferentes grados de inclinación de los módulos fotovoltaicos analizados a lo largo del año.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
<b>Enero</b>	2,09	2,62	3,09	3,49	3,80	4,01	4,11	4,10	3,97	2,57
<b>Febrero</b>	3,01	3,59	4,09	4,49	4,77	4,93	4,96	4,85	4,61	3,54
<b>Marzo</b>	4,62	5,15	5,57	5,86	6,00	6,00	5,84	5,52	5,07	5,10
<b>Abril</b>	5,16	5,45	5,63	5,67	5,59	5,36	5,01	4,53	3,95	5,43
<b>Mayo</b>	6,34	6,47	6,47	6,32	6,04	5,62	5,06	4,40	3,65	6,46
<b>Junio</b>	7,11	7,15	7,03	6,78	6,3	5,82	5,15	4,36	3,50	7,15
<b>Julio</b>	7,06	7,16	7,10	6,89	6,51	5,99	5,33	4,55	3,68	7,15
<b>Agosto</b>	5,97	6,22	6,34	6,31	6,14	5,81	5,35	4,76	4,05	6,20
<b>Setiembre</b>	4,62	5,04	5,35	5,53	5,57	5,48	5,25	4,89	4,40	5,00
<b>Octubre</b>	3,35	3,86	4,28	4,61	4,82	4,91	4,87	4,70	4,41	3,81
<b>Noviembre</b>	2,28	2,81	3,28	3,66	3,96	4,15	4,23	4,19	4,04	2,76
<b>Diciembre</b>	1,83	2,34	2,80	3,19	3,50	3,71	3,83	3,84	3,74	2,29

#### 4.1.2 Determinación de la altura hidráulica de bombeo

La altura hidráulica total de bombeo es la presión efectiva que debe vencer la bomba para satisfacer las necesidades hidráulicas y depende de la altura estática, la dinámica y el abatimiento del pozo.

Siguiendo el procedimiento de cálculo expuesto en el apartado (3.3) y las dimensiones de la instalación de la *tabla 4*, las alturas obtenidas se exponen en la siguiente tabla:

**Tabla 7** – Altura estática, dinámica, abatimiento y altura hidráulica total de bombeo para el sistema de bombeo proyectado.

Altura estática [m]	Altura dinámica [m]	Abatimiento [m]	Altura hidráulica de bombeo [m]
12	$2,43 \cdot 10^{-5}$	1	13

#### 4.1.3 Mes de dimensionado

La instalación se debe dimensionar con los datos de demanda hidráulica más elevada y su correspondiente radiación solar a la inclinación óptima para poder satisfacer energéticamente la alimentación de la bomba. Para ello, se debe calcular el coeficiente entre caudal medio mensual y las radiaciones de cada mes para diferentes inclinaciones,  $\frac{Q_i}{I_{OT,i}}$ .

Posteriormente, el valor mínimo entre los máximos de dicho mes, contendrá los datos hidráulicos y energéticos utilizados como base para dimensionar los componentes del sistema:

demanda hidráulica más elevada y radiación máxima de ese mes para diferentes inclinaciones, por lo tanto, también obtendremos la inclinación óptima del módulo.

**Tabla 8** – Coeficientes de la demanda hidráulica total y radiación solar media para diferentes grados de inclinación de los módulos fotovoltaicos analizados a lo largo del año.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
<b>Enero</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Febrero</b>	1886,05	1581,34	1388,02	1264,37	1190,15	1151,52	1144,56	1170,52	1231,45	1603,67
<b>Marzo</b>	2048,05	1837,28	1698,74	1614,68	1577	1577	1620,21	1714,13	1866,27	1855,29
<b>Abril</b>	2619,57	2530,00	2400,89	2383,95	2418,07	2521,83	2698	2983,89	3422,03	2489,32
<b>Mayo</b>	2664,98	2611,44	2611,44	2673,42	2797,35	3006,41	3339,13	3840	4629,04	2615,48
<b>Junio</b>	2970,46	2953,85	3004,27	3115,04	3352,38	3628,87	4100,97	4844,04	6034,29	2953,85
<b>Julio</b>	3739,38	<b>3687,15</b>	3718,31	3831,64	4055,30	4407,35	4953,10	5802,20	7173,91	3692,31
<b>Agosto</b>	3537,69	3395,50	3331,23	3347,07	3439,74	3635,11	3947,66	4436,97	5214,81	3406,45
<b>Setiembre</b>	3657,14	3352,38	3158,13	3055,33	3033,39	3083,21	3218,29	3455,21	3840	3379,20
<b>Octubre</b>	4034,93	3501,81	3158,18	2932,10	2804,36	2752,95	2775,56	2875,96	3065,08	3547,77
<b>Noviembre</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Diciembre</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El valor mínimo entre los máximos de cada columna de la matriz creada, es el correspondiente al mes con mayor demanda hidráulica a la inclinación óptima para obtener el máximo de radiación solar posible, del cual podemos extraer los siguientes datos para el dimensionado de la instalación:

**Tabla 9** – Mes de dimensionado con los correspondientes requerimientos hidráulicos y energéticos necesarios para el dimensionado

Mes de dimensionado	Demanda hidráulica (DHT <sub>i</sub> ) [m <sup>3</sup> ]	Caudal medio (Q <sub>i</sub> ) [m <sup>3</sup> /h]	Radiación solar media mensual (I <sub>OT,i</sub> ) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Inclinación del módulo fotovoltaico (α) [°]
Julio	26400	5	7,16	10

#### 4.1.4 Determinación del equipo de bombeo

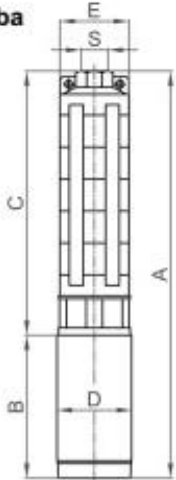
La determinación del equipo de bombeo que mejor se adapte a los requerimientos expuestos en la tabla 10 debe de hacerse analizando los datos técnicos facilitados por el fabricante.

**Tabla 10** – Criterios de diseño de la bomba

Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Altura hidráulica de bombeo [m]
5	13

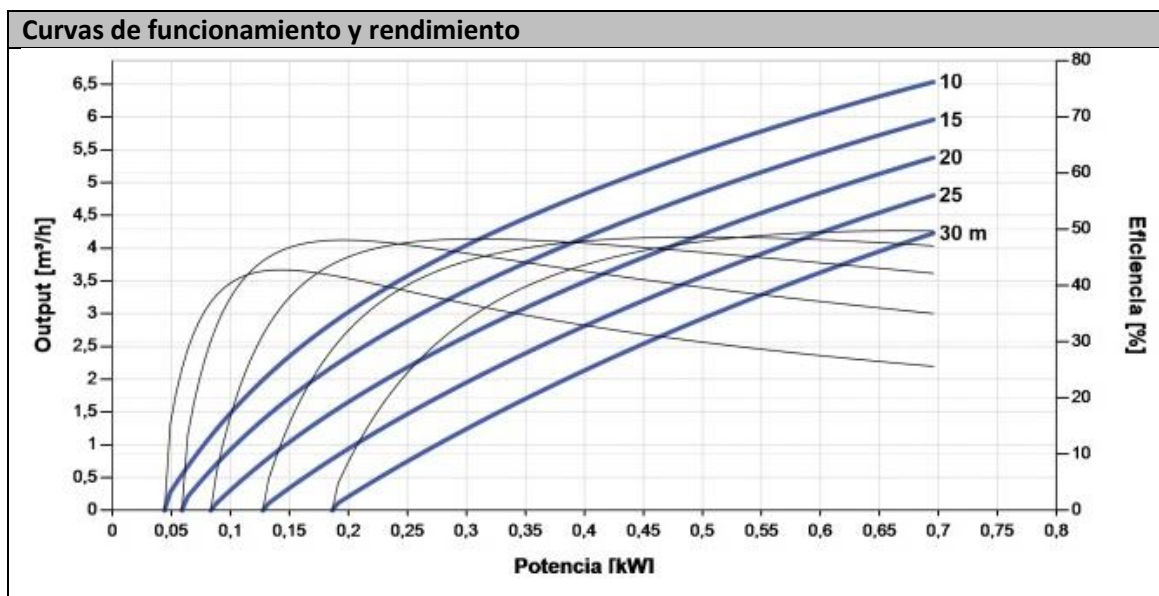
El modelo de la bomba solar que se ha seleccionado que cumple con los requerimientos de bombeo establecidos es la **PS600 C-SJ5-8** de **LORENTZ**<sup>4</sup>.

**Tabla 11** – Resumen de la ficha técnica del modelo PS600 C-SJ5-8 de LORENTZ

<b>Modelo de bomba: PS600 C-SJ5-8 de LORENTZ</b>	
Tipo	Bomba sumergible para el suministro de agua subterránea, provista de motor DC sin escobillas.
Caudal máximo	6,5 m <sup>3</sup> /h
Altura máxima:	30 m
<b>Materiales</b>	
Motor	Acero inoxidable, AISI 304/3016
Cabeza de bomba:	Acero inoxidable, AISI 304
<b>Datos del motor</b>	
Potencia nominal	0,70 kW
Eficiencia	Máx. 92%
Revoluciones motor	900-3300 rpm
Clase de aislamiento	F
Modo de protección	IP 68
Tensión nominal de trabajo	48 V
Inmersión máxima	250 m
<b>Funcionamiento solar</b>	
Voltaje a potencia máxima	>68 VDC
Voltaje a circuito abierto	Máx. 150 VDC
Voltaje nominal	48 VDC
<b>Pesos</b>	
Motor	7,0 kg
Cabeza de bomba	4,2 kg
<b>Dimensiones</b>	
<p><b>Unidad de bomba</b></p> <p> A = 21 in  B = 7.3 in  C = 13 in  D = 3.8 in  E = 3.9 in  S = 1.5 in </p> 	

<sup>4</sup> Ficha técnica del modelo en el *apéndice 6.2*.





#### 4.1.5 Consumo energético estimado de la bomba sumergible

Utilizando las ecuaciones (13), (14) y (15) expuestas en el apartado (3.5) se puede determinar el consumo energético de la bomba suponiendo que tendrá un funcionamiento medio de 8 horas al día.

Tabla 12 – Consumo energético de la bomba seleccionada

Potencia teórica [kW]	Potencia real [kW]	Consumo energético estimado [kWh]
0,307	0,526	4,208

Con las curvas de funcionamiento, teniendo en cuenta la potencia y el caudal que debe suministrar la bomba, puede calcularse el punto de funcionamiento de la bomba seleccionada en la instalación. El rendimiento de la bomba puede determinarse gráficamente, en este caso es del 58,3%.

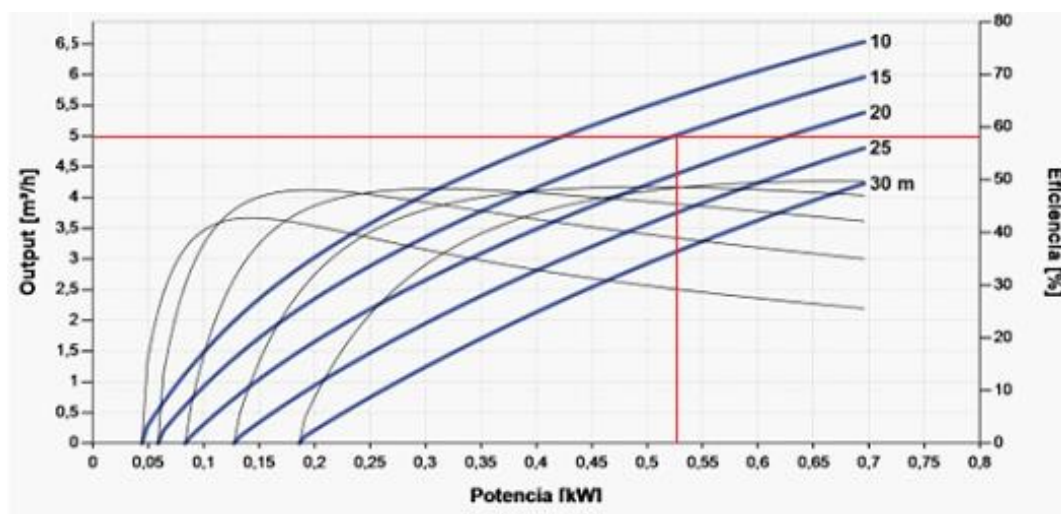


Figura 14 – Punto de funcionamiento de la bomba

#### 4.1.6 Determinación del número y disposición de los módulos

En primer lugar, para la determinación del número y disposición de los módulos, debe de elegirse un modelo de panel fotovoltaico y conocer sus datos técnicos facilitados por el fabricante.

En la instalación se ha elegido el panel solar REC 260PE<sup>5</sup> con las siguientes características:

**Tabla 13** – Resumen de la ficha técnica del modelo de módulo fotovoltaico REC 260PE

<b>Modelo: REC 260PE</b>	
<b>Parámetros térmicos</b>	
<b>Temperatura de operación nominal</b>	45,7 °C
<b>Coeficiente de temperatura</b>	0,40%
<b>Datos generales</b>	
<b>Tipo de célula</b>	60 células policristalinas REC PE. 3 cadenas de 20 células con diodos de derivación
<b>Cristal</b>	Vidrio solar de 3,2 mm con tratamiento anti reflectante
<b>Lámina posterior</b>	Doble capa de poliéster de alta resistencia
<b>Marco</b>	Aluminio anodizado
<b>Conectores</b>	Multi-Contact MC4 (4mm <sup>2</sup> )
<b>Origen</b>	Fabricado en Singapur
<b>Parámetros eléctricos</b>	
<b>Potencia nominal</b>	260 W
<b>Clasificación de la clase de potencia</b>	0/+5 W
<b>Tensión nominal</b>	30,7 V
<b>Corriente nominal</b>	8,50 A
<b>Tensión a circuito abierto</b>	37,8 V
<b>Corriente corto circuito</b>	9,01 A
<b>Eficiencia del módulo</b>	15,8 %
<b>Datos mecánicos</b>	
<b>Dimensiones</b>	1665x991x38 mm
<b>Área</b>	1,65 m <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	18 kg

Siguiendo el procedimiento de cálculo del apartado (3.6), en primer lugar, se debe conocer el número de módulos fotovoltaicos necesarios en la instalación con la ecuación (16):

$$N_{mód} = \frac{2430,4}{260 \cdot 7,16 \cdot (1 - 0,25)} = 1,7384 \rightarrow 2$$

Puesto que de la ecuación se obtiene un numero de paneles con valores decimales, el resultado se redondea al siguiente número entero para asegurar el suministro de energía necesaria para el funcionamiento de la instalación. En el algoritmo creado para el cálculo de los parámetros de la instalación (*apéndice 5.1*), se utiliza el comando “round” para realizar esta

<sup>5</sup> Ficha técnica en el *apéndice 6.3*.

modificación en el cálculo del número de módulos y su disposición en serie o paralelo, obteniendo los siguientes resultados:

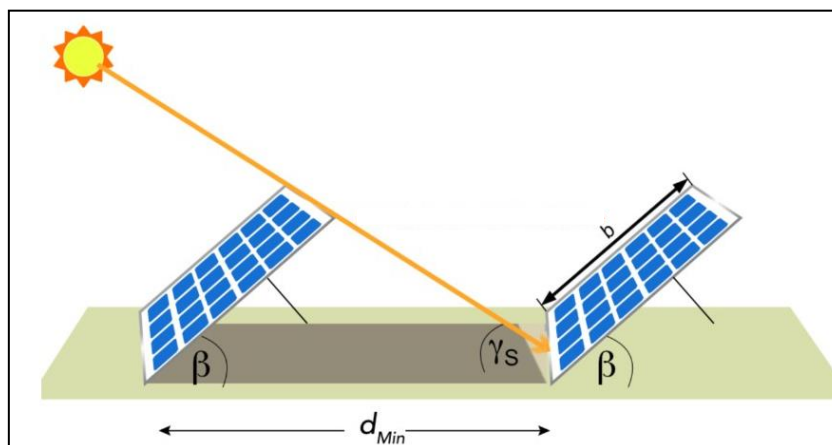
**Tabla 14** – Número y disposición de los módulos fotovoltaicos

Número de módulos	Módulos en serie	Módulos en paralelo
2	2	1

Los módulos se instalarán sobre el terreno de la propiedad, a la distancia mínima posible del pozo. Con la disposición de los módulos proyectada, existe riesgo al sombreado entre colectores solares, puesto que se ha dimensionado solamente una fila en paralelo de dos módulos en serie. Por otra parte, sí que existe el riesgo de sombreado originado por unos árboles (pinos piñoneros) de 5 m de altura aproximadamente situados junto al pozo.

Para evitar que la sombra de los pinos afecte en la captación de radiación solar de los módulos, debe calcularse la distancia mínima en la que se tienen que instalar:

$$d_{min} = b \cdot \frac{\sin(\gamma_s + \beta)}{\sin\gamma_s} \quad (25)$$



**Figura 15** - Dimensiones que afectan al sombreado de los paneles fotovoltaicos

En este caso, al no tener más de una fila de módulos en paralelo, se calculará la distancia mínima entre los pinos y los módulos solares con los siguientes datos:

$\beta = 90^\circ$ , inclinación de los árboles.

$b = 5 \text{ m}$ , altura máxima de los árboles.

$\gamma_s = 30^\circ$ , grado de inclinación mínima, determinado gráficamente mediante la *figura (16)*, teniendo en cuenta que no hay demanda hidráulica entre los meses de noviembre y enero.

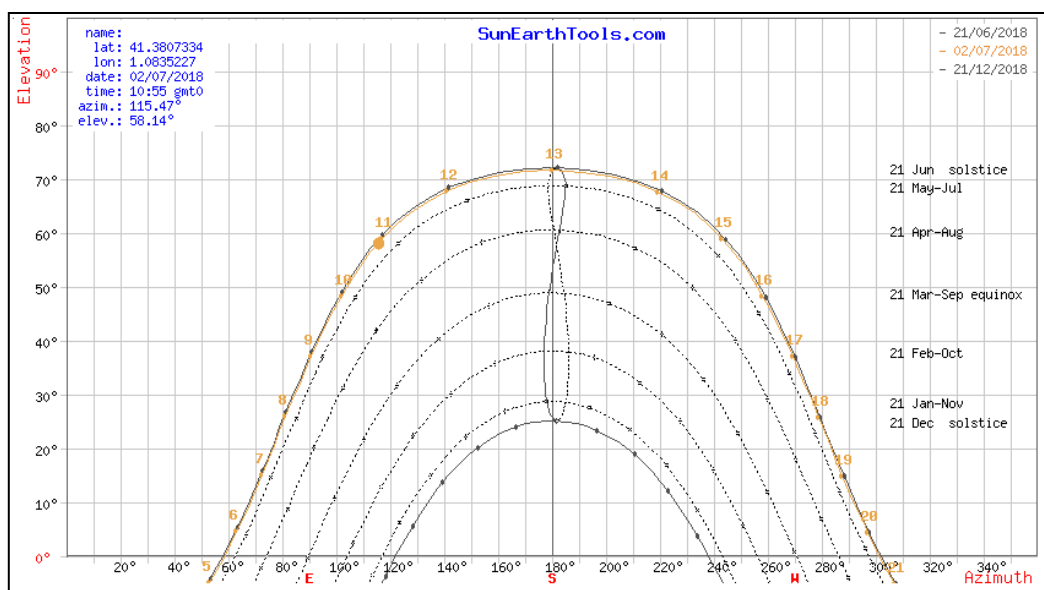


Figura 16 – Diagrama solar del emplazamiento de la instalación

Tabla 15 – Resultado del cálculo de la distancia mínima entre los árboles y módulos fotovoltaicos de la instalación

Distancia mínima entre árboles-módulos [m]
8,66 → 10

Finalmente, se instalarán los módulos fotovoltaicos a una distancia de 10 m de los pinos y el pozo, aunque la distancia mínima sea de 8,66 m, para así tener en cuenta la posibilidad de relieve en el terreno. Para el buen ancoraje de los generadores solares se instalará una estructura a nivel del suelo, encargada de aportar la orientación (0º) e inclinación (10º) adecuada para un rendimiento óptimo de la instalación proyectada y que paralelamente, facilitará las tareas de mantenimiento e instalación.



Figura 17 – Disposición de los módulos fotovoltaicos para evitar el sombreado

#### 4.1.7 Determinación del regulador

La bomba anteriormente seleccionada incluye un regulador modelo PS2-600 de Lorentz con los siguientes datos técnicos:

**Tabla 16** – Resumen de la ficha técnica del modelo de regulador PS2-600

Modelo de regulador: PS2-600	
Características	<ul style="list-style-type: none"><li>- Controlar y supervisar</li><li>- Entradas de control para protección contra operación en seco, control remoto, etc.</li><li>- Protegido contra polaridad reversa, sobrecarga y temperatura excesiva</li><li>- MPPT (Maximum Power Point Tracking) integrado</li><li>- Funcionamiento con batería: protección integrada contra descarga total</li></ul>
Potencia	Máx. 0,7 kW
Voltaje máximo de entrada	Máx. 150 V
Voltaje mínimo recomendado	68 V
Corriente máxima de entrada	13 A
Eficiencia	Máx. 98%
Temperatura del ambiente	-40 – 50°C
Modo de protección	IP68

Se debe comprobar que el regulador incluido en la bomba seleccionada tenga un buen funcionamiento en la instalación, por lo tanto, tiene que cumplir con las exigencias de corriente expuestas en el apartado (3.7):

Dado que el regulador seleccionado se encuentra integrado en la bomba centrífuga sumergible, los parámetros de diseño del modelo aseguran soportar la corriente y tensión máxima de salida, es decir, la proveniente de la bomba, ajustándose a las condiciones de operación. En este caso, se debe comprobar solamente que la corriente, tensión y potencia de entrada estén dentro del rango de operación del regulador:

- Soportar la corriente máxima de entrada proveniente los módulos fotovoltaicos:

$$I_{R,e} \equiv \text{Corriente máxima de entrada} = 11,26 \text{ A} < 13 \text{ A}$$

- Según la configuración prevista, el regulador va ser alimentado por un sistema generador fotovoltaico compuesto de un ramal en paralelo con 2 módulos fotovoltaicos en serie. Por lo tanto, la tensión y la potencia de entrada al regulador serán:

$$V_{R,e} \equiv \text{Tensión máxima de entrada} = 2 \cdot 30,7 = 61,4 \text{ V}$$

$$P_{R,e} \equiv \text{Potencia máxima de entrada} = 2 \cdot 260 = 520 \text{ W}$$

- Soportar la máxima tensión de entrada proveniente de los módulos fotovoltaicos:

$$V_{R,e} = 61,4 \text{ V} < 150 \text{ V}$$

- Soportar la potencia máxima de entrada proveniente de los módulos fotovoltaicos:

$$P_{R,e} = 520 \text{ W} < 700 \text{ W}$$

#### 4.2.9. Determinación del cableado eléctrico y protecciones

El cableado eléctrico que forma parte de la instalación objeto se compone de dos tramos principales:

- Tramo 1: desde la caja de conexión de los módulos solares hasta el regulador de carga
- Tramo 2: desde la salida del regulador hasta la conexión a los bornes del motor eléctrico de la bomba sumergible

En ambos casos la corriente será continua y se compondrán de dos conductores activos, uno positivo, otro negativo y uno de protección del mismo material que los conductores activos utilizados en la instalación, en este caso, de cobre.

Para la aplicación de la ecuación es necesario saber la longitud del cable del tramo que se esté considerando, es decir, se necesita saber la distancia entre la caja de conexión de los módulos solares, el regulador y la bomba sumergible.

**Tabla 17** – Longitudes para la determinación del cableado eléctrico en la instalación

<b>Tramo 1: Módulos fotovoltaicos – Regulador (<math>L_1</math>)</b>	4 m
<b>Tramo 2: Regulador – Bomba sumergible (<math>L_2</math>)</b>	10 m

Con la aplicación de la ecuación (1) expuesta en el apartado (2.3), puede calcularse la sección de los cables y seleccionar el tipo de cable PV ZZ-F:

Tramo	Longitud del tramo [m]	Intensidad de corriente del tramo [A]	Sección de cable mínima calculada [mm <sup>2</sup> ]	Sección de cable seleccionada [mm <sup>2</sup> ]	Sección de cable de protección [mm]
Módulos – regulador	4	18,020	4,192	6	6
Regulador - Bomba	10	21,875	5,425	6	6

Aunque el regulador elegido lleva un sistema de protección frente a la polaridad reversa, sobrecarga y temperatura excesiva, también se realizará la instalación de fusibles para una protección adicional contra sobre intensidades originadas por sobrecargas o cortocircuitos.

Se ha hecho la elección de cartuchos de fusibles de cuchilla de tipo *GPV 1000V DC* de uso específico para instalaciones fotovoltaicas de la marca DF Electric. Este tipo de fusibles proporciona una adecuada protección contra sobrecargas y cortocircuitos de acuerdo a la norma IEC 60269-6, y con una corriente mínima de fusión de  $1,35 \cdot I_n$ , capaz de interrumpir el paso de todas las corrientes que vayan desde su valor de intensidad nominal hasta su poder de corte asignado.

**Tabla 18** – Características de los cartuchos de fusibles de cuchilla *GPV 1000V DC* para cada uno de los tramos en corriente continua de la instalación

Tramo	Intensidad nominal [A]	Tensión nominal [V]	Poder de corte [kA]
Módulos – Regulador	25	1000	30
Regulador – Bomba	25	1000	30

Según la expresión (35), para que el fusible seleccionado sea efectivo, debe cumplir que

$$I_b \leq I_n \leq 0,9 \cdot I_{adm}$$

A continuación se adjunta una tabla resumen con la protección asignada a cada tramo:

**Tabla 19** – Protección asignada a cada tramo

Tramo	$I_b$ [A]	$I_n$ [A]	$0,9 \cdot I_{adm}$ [A]
Módulos – Regulador	18,020	25	63
Regulador - Bomba	21,875	25	63

## 5. Conclusiones

Para la instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico directo en un terreno de 22 ha. situado en Vimbodí i Poblet (Tarragona, Cataluña), se ha realizado un estudio basado en el organigrama expuesto en el apartado (3.10) y extraído de la información de la la “Guía para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica, Sandia National Laboratories, Southwest Technology Development Institute (NMSU/SWTDI)”. Para ello, primero se ha realizado un estudio del emplazamiento y dimensiones de la parcela:



**Figura 18** – Emplazamiento de la instalación con referencia catastral 43178A036001870000OP y coordenadas decimales: latitud – 41,378932138364º y longitud – 1,0659872597919957º.

Posteriormente, se ha obtenido la altura hidráulica de bombeo, con un resultado de 13 metros, junto a las necesidades hidráulicas y la radiación solar disponible media mensual para diferentes ángulos de inclinación de los módulos fotovoltaicos en todo un año, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 20** – Demanda hidráulica, caudal medio y radiación solar mensual para diferentes grados de inclinación.

Mes	Demanda hidráulica total [m³]	Caudal medio [m³/h]	Radiación solar disponible media mensual en [kWh/m²] para diferentes grados de inclinación del módulo fotovoltaico.									
			0º	10º	20º	30º	40º	50º	60º	70º	80º	90º
ENERO	0	0	2.09	2.62	3.09	3.49	3.80	4.01	4.11	4.10	3.97	2.57
FEBRERO	5677	1,07	3.01	3.59	4.09	4.49	4.77	4.93	4.96	4.85	4.61	3.54
MARZO	9462	1,79	4.62	5.15	5.57	5.86	6.00	6.00	5.84	5.52	5.07	5.10
ABRIL	13517	2,56	5.16	5.45	5.63	5.67	5.59	5.36	5.01	4.53	3.95	5.43
MAYO	16896	3,20	6.34	6.47	6.47	6.32	6.04	5.62	5.06	4.40	3.65	6.46
JUNIO	21120	4,00	7.11	7.15	7.03	6.78	6.3	5.82	5.15	4.36	3.50	7.15
JULIO	26400	5,00	7.06	7.16	7.10	6.89	6.51	5.99	5.33	4.55	3.68	7.15
AGOSTO	21120	4,00	5.97	6.22	6.34	6.31	6.14	5.81	5.35	4.76	4.05	6.20
SETIEMBRE	16896	3,20	4.62	5.04	5.35	5.53	5.57	5.48	5.25	4.89	4.40	5.00
OCTUBRE	13517	2,56	33.35	3.86	4.28	4.61	4.82	4.91	4.87	4.70	4.41	3.81
NOVIEMBRE	0	0	2.28	2.81	3.28	3.66	3.96	4.15	4.23	4.19	4.04	2.76
DICIEMBRE	0	0	1.83	2.34	2.80	3.19	3.50	3.71	3.83	3.84	3.74	2.29



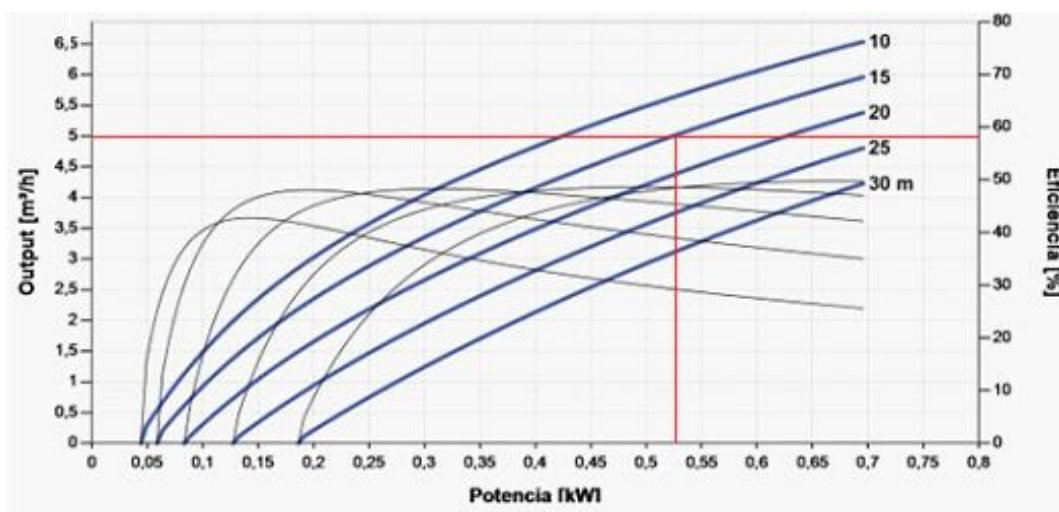
Analizando los datos obtenidos, se ha elegido el mes de julio para el dimensionado, puesto que es el periodo el cual tiene una demanda hidráulica más elevada en relación a la radiación solar disponible. La inclinación de los módulos, será de 10° respecto la horizontal, puesto que es la que ofrece una captación mayor de radiación solar por metro cuadrado.

El equipo de bombeo ha sido la bomba solar sumergible **PS600 C-SJ5-8** del proveedor Lorentz (ficha técnica adjunta en el *apéndice 5.2*), con las siguientes características principales:

**Tabla 21** – Características principales del modelo de bomba PS600 C-SJ5-8 de Lorentz

<b>Caudal máximo</b>	6,5 m <sup>3</sup> /h
<b>Altura máxima:</b>	30 m
<b>Potencia nominal</b>	0,70 kW
<b>Eficiencia</b>	Máx. 92%
<b>Tensión nominal de trabajo</b>	48 V
<b>Inmersión máxima</b>	250 m
<b>Voltaje nominal</b>	48 VDC

Posteriormente, se ha obtenido analíticamente el consumo energético de la bomba, 4,208 kWh y gráficamente, su punto de funcionamiento:



**Figura 19** – Punto de funcionamiento de la bomba

Una vez definido el sistema hidráulico, para satisfacer su demanda, se ha elegido el modelo de módulo fotovoltaico **REC 260PE** (ficha técnica adjunta en el *apéndice 5.3*) con las siguientes características principales para poder obtener el número de módulos y su disposición:

**Tabla 22** – Características principales del modelo de módulos fotovoltaicos REC 260PE

<b>Potencia nominal</b>	260 W
<b>Corriente corto circuito</b>	9,01 A
<b>Tensión nominal</b>	30,7 V
<b>Temperatura de operación nominal</b>	45,7 °C
<b>Coefficiente de temperatura</b>	0,40%
<b>Dimensiones</b>	1665x991x38 mm

**Tabla 23** – Número y disposición de los módulos fotovoltaicos

Número de módulos	Módulos en serie	Módulos en paralelo
2	2	1

Para la instalación de los módulos fotovoltaicos, es necesario conocer la distancia mínima entre los módulos y posibles elementos a su alrededor que provoquen sombreados sobre ellos. En este dimensionado, los módulos se instalarán cerca del pozo de obtención de agua subterránea puesto que está situado en una parte del terreno donde no hay cultivo, aunque existe una plantación de pinos piñoneros de altura próximos a la zona de instalación. Haciendo un estudio del diagrama solar del emplazamiento y teniendo en cuenta los 5 metros de altura de los árboles, la distancia mínima entre los árboles y los módulos para su instalación será de 10 metros, y éstos se instalarán al nivel del suelo con orientación de 0° respecto al sur.



**Figura 20** – Punto de instalación de los módulos fotovoltaicos

Una vez definida la disposición de los módulos fotovoltaicos, se ha seleccionado un regulador capaz de soportar la máxima corriente, tensión y potencia de entrada y salida para controlar el funcionamiento óptimo de la bomba sumergible.

El modelo elegido, **PS2-600** de Lorentz, se encuentra integrado en la bomba, por lo que ya ha sido diseñado para resistir la máxima corriente, tensión y potencia de salida proveniente de la bomba. En cuanto a los parámetros de entrada provenientes de los módulos fotovoltaicos, se ha comprobado que el regulador también es capaz de soportarlos:

	Entrada al regulador	Máxima que puede soportar el regulador
<b>Corriente [A]</b>	11,26	13
<b>Tensión [V]</b>	61,4	150
<b>Potencia [W]</b>	520	700

Para la interconexión la instalación se ha seleccionado el cableado eléctrico del tipo **PV ZZ-F** calculando su sección y diferenciando los dos tramos en los que se instalarán, puesto que son de longitudes diferentes: de los módulos fotovoltaicos al regulador y del regulador a la bomba sumergible.

Finalmente, para la protección contra sobrecargas y cortocircuitos del sistema, se ha hecho la elección de cartuchos de fusibles de cuchilla tipo **GPV 1000V DC** de uso específico para instalaciones fotovoltaicas de la marca DF Electric, puesto que cumplen con la siguiente condición:

$$I_b \leq I_n \leq 0,9 \cdot I_{adm}$$

Tramo	Longitud del tramo [m]	Sección de cable seleccionada [mm <sup>2</sup> ]	Sección de cable de protección [mm]	I <sub>b</sub> [A]	I <sub>n</sub> [A]	0.9·I <sub>adm</sub> [A]
Módulos – Regulador	4	6	6	18,020	25	63
Regulador – Bomba	10	6	6	21,875	25	63

## 6. Apéndice

### 6.1 Código Matlab para la resolución de los cálculos en la instalación

```
%%Parametros físicos de la instalación (tubería y fluido)
L=144.5+142.2+19.8; %longitud de la tubería [m]
D=0.63; %diámetro de la tubería [m]
g=9.81; %gravedad [m/s^2]
vi=1.06e-6; %viscosidad del agua [m^2/s]
Tamb=25; %Temperatura ambiente media mensual [°C]
rug=.1e-3; %Rugosidad del tubo [m]
Sup=22; %Superficie de la parcela [ha]
rho=1; %Densidad agua [kg/dm3]

%% 4.2.1 NECESIDADES HIDRÁULICAS %%
DH=[0 258 430 614 768 960 1200 960 768 614 0 0]; %demanda
hidráulica mensual [m^3/ha]
DHT=DH*Sup; %demanda hidráulica mensual [m^3]
t=30*8; %tiempo de funcionamiento de la bomba mensual [h]
Q=DH/t; %caudal medio mensual [m^3/h]

%% 4.2.2 RADIACIÓN SOLAR DE CADA MES PARA DIFERENTES GRADOS DE
INCLINACIÓN DEL MÓDULO %%
RG= [2.09 2.62 3.09 3.49 3.80 4.01 4.11 4.10 3.97 2.57];
RF= [3.01 3.59 4.09 4.49 4.77 4.93 4.96 4.85 4.61 3.54];
RM= [4.62 5.15 5.57 5.86 6.00 6.00 5.84 5.52 5.07 5.10];
RA= [5.16 5.34 5.63 5.67 5.59 5.36 5.01 4.53 3.95 5.43];
RMY=[6.34 6.47 6.47 6.32 6.04 5.62 5.06 4.40 3.65 6.46];
RJN=[7.11 7.15 7.03 6.78 6.30 5.82 5.15 4.36 3.50 7.15];
RJL=[7.06 7.16 7.10 6.89 6.51 5.99 5.33 4.55 3.68 7.15];
RAG=[5.97 6.22 6.34 6.31 6.14 5.81 5.35 4.76 4.05 6.20];
RS= [4.62 5.04 5.35 5.53 5.57 5.48 5.25 4.89 4.40 5.00];
RO= [3.35 3.86 4.28 4.61 4.82 4.91 4.87 4.70 4.41 3.81];
RN= [2.28 2.81 3.28 3.66 3.96 4.15 4.23 4.19 4.04 2.76];
RD= [1.83 2.34 2.80 3.19 3.50 3.71 3.83 3.84 3.74 2.29];
%Radiación media solar mensual
HSP=[RG;RF;RM;RA;RMY;RJN;RJL;RAG;RS;RO;RN;RD];
%Grados de inclinación del módulo
G=linspace(0,90,10);

%% 4.2.3 ALTURA HIDRÁULICA DE LA BOMBA %%
%%Altura estatica
He=12; %[m]

%%Altura dinámica
%perdidas continuas
S=pi*D^2/4; %Sección de la tubería [m^2]
v=Q(7)/3600/S; %velocitat en [m/s] (Cabal en [m^3/s])
Re=v*D/vi;
if Re<=2300
    f=64/Re;
else
    f=1.325/((log(rug/3.71/D+5.74/(Re^0.9)))^2);
end
hc=f*L*v^2/D/2/g;
%perdidas singulares
k=[0.42 0.9];
```

```

hs=sum(k)*v^2/2/g;

Hd=hc+hs;

%%Abatimiento de pozo
Sab=1;

h=He+Hd+Sab;

%%% 4.2.4 MES DE DIMENSIONADO %%%
MES=zeros(length(DHT),length(G));
for i=1:12
    MES(i,:)=round(DHT(i)./HSP(i,:),2);
end
MD=min(max(MES)); %Mes de dimensionamiento
HSPi=max(HSP(7,:)); %Radiacion media del mes de dimensionado [kWh/m^2]
Qi=max(Q); %Caudal en el mes de dimensionamiento [m^3/h]
Ei=HSPi*1e3/8; %Radiacion media en el mes de julio [W/m^2]

%%% 4.2.5 DETERMINACIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO %%%
%Datos técnicos de la bomba
r=0.583; %Rendimiento global [%]
Vnb=48; %Tensión nominal de trabajo del motor eléctrico de la
bomba[V]
Pdc=700; %Potencia nominal de la bomba [W]

%%% 4.2.6 CONSUMO ENERGÉTICO ESTIMADO DE LA BOMBA %%%
Pteorica=Qi*h*rho/367; %Potencia teórica de la bomba [kW]
Preal=Pteorica/r; %Potencia real de la bomba [kW]
Ce=Preal*8; %Consumo energético estimado de la bomba [kWh]

%%% 4.2.7 NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS %%%
%Datos técnicos módulo
Pmp=260; %Potencia pico del módulo [W]
Kt=0.004; %Coeficiente de temperatura [°C^-1]
Tonc=45.7; %Temperatura de operacion nominal de la célula [°C]
Vpmax=30.7; %Tensión en el punto de máxima potencia del módulo [V]
Isc=9.01; %Intensidad de cortocircuito (maxima intensidad si
tensión=0) [A]

%%PR
Tc=Tamb+(Tonc-20)*Ei/800; %Temperatura media mensual de trabajo
[°C]
PRt=Kt*(Tc-25); %Pérdida por incremento de temperatura [%]
PRdp=3; %Pérdida por dispersión de potencia [%]
PRsu=3; %Pérdida por acumulación de suciedad [%]
PRso=2; %Pérdida por sobras [%]
PRdm=1; %Pérdida por degradación de los módulos [%]
PRE=1.5; %Pérdida eléctrica [%]
PRr=2.9; %Pérdida por reflectancia [%]
PR=.01*(PRdp+PRt*1e2+PRsu+PRso+PRdm+PRE+PRr);

Nmod=round(Ce*1e3/Pmp/HSPi/(1-PR),0);
Nserie=round(Vnb/Vpmax,0);
Nparalelo=Nmod/Nserie;

B=90;
Y=30;

```

```

Lm=5;
dmin=Lm*sind(Y+B)/sind(Y);
%%% 4.2.8 REGULADOR %%%
Ire=1.25*Isc*Nparalelo; %Máxima corriente de entrada [A]
Irs=1.5*Pdc/Vnb; %Máxima corriente de salida [A]
Vre=Vpmax*Nserie; %Máxima tensión de entrada [V]
Pre=Pmp*Nserie; %Máxima potencia de entrada [W]

%%% 4.2.9 CABLEADO ELECTRICO %%%

Lc=[4,10];
AU=[Vpmax*2*.01,Vnb*.03];
Kcu=56;
S1=2*Lc(1)*Isc*2/AU(1)/Kcu;
S2=2*Lc(2)*Irs/AU(2)/Kcu;

```

## 6.2 Bomba sumergible PS2-600 C-SJ5-8



# PS2-600 C-SJ5-8

## Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

### Gama de sistemas

Altura	max. 30 m
Flujo	max. 6.5 m³/h

### Datos técnicos

#### Controlador PS2-600

- Controlar y supervisar
- Entradas de control para protección contra operación en seco, control remoto, etc.
- Protegido contra polaridad reversa, sobre carga y temperatura excesiva
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) integrado
- Funcionamiento con batería: protección integrada contra descarga total

Potencia	max. 0.70 kW
Voltaje de entrada	max. 150 V
Óptimo Vmp**	> 68 V
Corriente motor	max. 13 A
Eficiencia	max. 98 %
Temp. del ambiente	-40...50 °C
Modo de protección	IP68

#### Motor ECDRIVE 600-C

- Motor CD sin escobillas - libre de mantenimiento
- Llenada de agua
- Materiales Premium, acero inoxidable: AISI 304/316
- Sin elementos electrónicos en el motor

Potencia nominal	0.7 kW
Eficiencia	max. 92 %
Revoluciones motor	900...3,300 rpm
Clase de aislamiento	F
Modo de protección	IP68
Inmersión	max. 150 m

#### Cabeza de bomba PE C-SJ5-8

- Válvula no retorno
- Materiales Premium, acero inoxidable: AISI 304
- Opcional: protección contra operación en seco
- Bomba centrífuga

Eficiencia	max. 55 %
------------	-----------



#### Undidad de bomba PU600 C-SJ5-8 (Motor, Cabeza de bomba)

Diámetro de perforación	min. 4,0 in
Temperatura del agua	max. 50 °C

### Normas



2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995

El logo refleja la aprobación que ha sido garantizada para este producto familiar. Los productos son ordenados con la aprobaciones específicas que el mercado requiera.

\*\*Vmp: Voltaje máximo de carga bajo STC

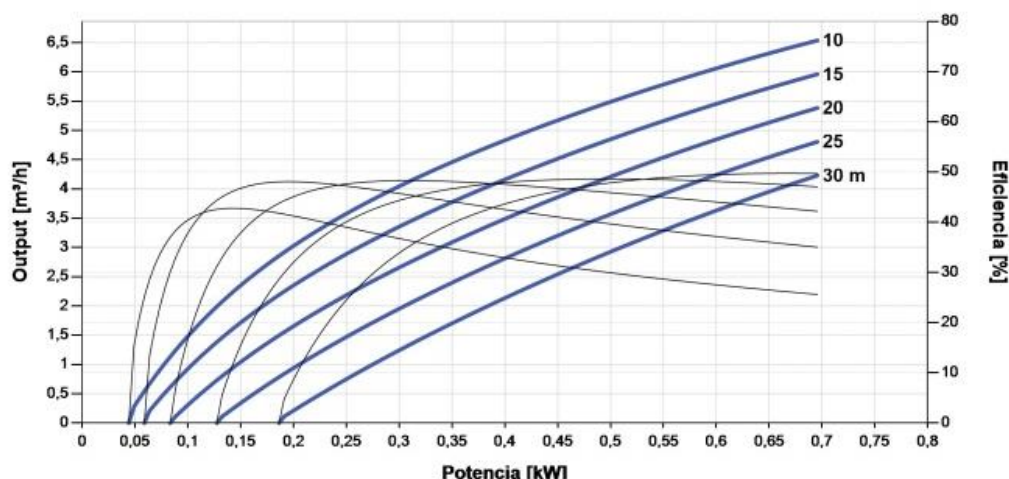


# PS2-600 C-SJ5-8

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

Plantilla de datos de la bomba

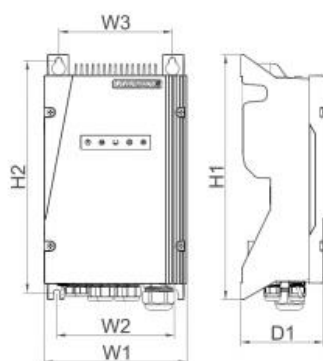
Vmp\* > 68 V



## Dimensiones y pesos

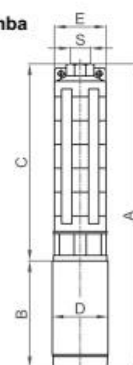
### Controlador

H1 = 14 in  
H2 = 13 in  
W1 = 8.1 in  
W2 = 6.7 in  
W3 = 6.5 in  
D1 = 4.9 in



### Unidad de bomba

A = 21 in  
B = 7.3 in  
C = 13 in  
D = 3.8 in  
E = 3.9 in  
S = 1.5 in



	Peso neto
Controlador	5.6 kg
Unidad de bomba	11 kg
Motor	7.0 kg
Cabeza de bomba	4.2 kg

\*Vmp: Voltaje máximo de carga bajo STC

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG  
Siebenstuecken 24, 24558 Henstedt-Ultzburg,  
Germany, Tel +49 (0)4193 8806-700, www.lorenz.de



Creado por LORENTZ COMPASS 3.1.0.105

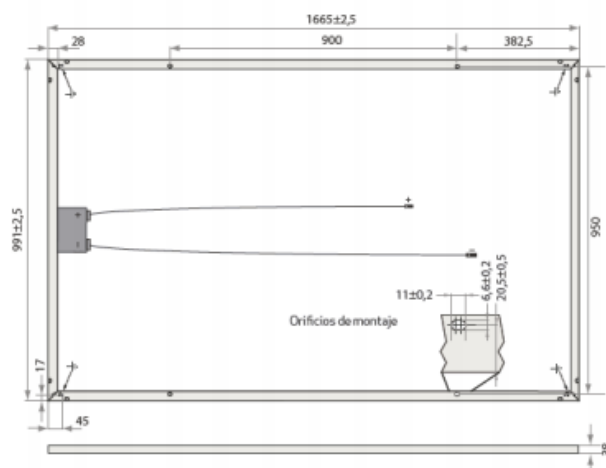
Todas las especificaciones e información están dadas con buenas intenciones. Los errores son posibles y los productos pueden estar sujetos a cambios sin ninguna notificación. Las fotografías pueden diferenciar de los productos actuales dependiendo de los requerimientos y regularizaciones del mercado local.

**Sun. Water. Life.**



## 6.3 Módulo fotovoltaico REC 260PE

# REC PEAK ENERGY SERIES



Dimensiones del módulo en mm.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS @ STC	REC240PE	REC245PE	REC250PE	REC255PE	REC260PE	REC265PE
Potencia nominal - $P_{MPP}$ (Wp)	240	245	250	255	260	265
Clasificación de la clase de potencia - (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Tensión nominal - $V_{MPP}$ (V)	29,7	30,1	30,2	30,5	30,7	30,9
Corriente nominal - $I_{MPP}$ (A)	8,17	8,23	8,30	8,42	8,50	8,58
Tensión a circuito abierto - $V_{OC}$ (V)	36,8	37,1	37,4	37,6	37,8	38,1
Corriente corto circuito - $I_{SC}$ (A)	8,75	8,80	8,86	8,95	9,01	9,08
Eficiencia del módulo (%)	14,5	14,8	15,1	15,5	15,8	16,1

Los datos analizados demuestran que el 99,7% de los módulos tienen una tolerancia de corriente y tensión del  $\pm 3\%$  respecto al valor nominal. Valores en condiciones estándares de medida STC (masa de aire AM1,5, irradiancia 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura a la célula 25°C). En bajas irradiancias de 200 W/m<sup>2</sup> y condiciones STC (1,5 AMy Temperatura a la célula de 25°C) es posible obtener, al menos el 97% de la eficiencia.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS @ NOCT	REC240PE	REC245PE	REC250PE	REC255PE	REC260PE	REC265PE
Potencia nominal - $P_{MPP}$ (Wp)	183	187	189	193	197	202
Tensión nominal - $V_{MPP}$ (V)	27,7	28,1	28,3	28,5	29,0	29,4
Corriente nominal - $I_{MPP}$ (A)	6,58	6,64	6,68	6,77	6,81	6,90
Tensión a circuito abierto - $V_{OC}$ (V)	34,4	34,7	35,0	35,3	35,7	36,0
Corriente de corto circuito - $I_{SC}$ (A)	7,03	7,08	7,12	7,21	7,24	7,30

Temperatura nominal de la célula (NOCT) 800W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, velocidad del viento 1m/s, temperatura ambiente 20°C.

### CERTIFICADOS



IEC 61215, IEC 61730 y UL 1703; IEC 62716 (resistencia al amoníaco); IEC 60068-2-68 (degradación por tormentas de arena); IEC 61701 (corrosión en presencia de niebla salina - nivel 1 & 6).

**takeaway**  
for an easy way

Esquema take-a-way de reciclaje compatible WEEE.

### GARANTÍA

10 años de garantía de producto  
25 años de garantía de la potencia nominal lineal (máxima degradación de rendimiento del 0,7% p.a.)  
(Ver detalles en las Condiciones de Garantía)

16,1% EFICIENCIA  
10 AÑOS DE GARANTÍA DE PRODUCTO  
25 AÑOS DE GARANTÍA LINEAL DE LA POTENCIA NOMINAL

### PARÁMETROS TÉRMICOS

Temp. de operación nominal de la célula (NOCT) 45,7°C ( $\pm 2^\circ$ C)  
Coeficiente de temperatura para  $P_{MPP}$  -0,40%/°C  
Coeficiente de temperatura  $V_{OC}$  -0,27%/°C  
Coeficiente de temperatura  $I_{SC}$  0,024%/°C

### DATOS GENERALES

Tipo de célula: 60 células policristalinas REC PE  
3 cadenas de 20 células con diodos de derivación  
Cristal: Vidrio solar de 3,2 mm con tratamiento antirreflectante  
Lámina posterior: Doble capa de poliéster de alta resistencia  
Marco: Aluminio anodizado  
Caja de conexiones: IP 67  
Cable solar 4mm<sup>2</sup>, 0,90 m + 1,20 m  
Conectores: Multi-Contact MC4 (4 mm<sup>2</sup>)  
Origen: Fabricado en Singapore

### LÍMITES OPERATIVOS

Margen de temperatura del módulo: -40 ... +85°C  
Voltaje máximo del sistema: 1000V  
Máxima carga de nieve: 550 kg/m<sup>2</sup> (5400 Pa)  
Máxima carga de viento: 244 kg/m<sup>2</sup> (2400 Pa)  
Capacidad máxima del fusible: 25A  
Máxima Corriente Inversa: 25A

### DATOS MECÁNICOS

Dimensiones: 1665 x 991 x 38 mm  
Área: 1,65 m<sup>2</sup>  
Peso: 18 kg

**¡Atención!** Las especificaciones están sujetas a cambios sin notificación previa.

Esta ficha técnica se ajusta a la norma EN 50380.

Ref: REC-05-05-01-R-3\_04\_14

REC es uno de los principales proveedores internacionales de soluciones de energía solar. Con más de 15 años de experiencia, ofrecemos productos sostenibles y de alto rendimiento, servicios e inversiones para el sector de la energía solar. En colaboración con nuestros distribuidores, ofrecemos valor añadido con soluciones que responden eficazmente a las crecientes necesidades mundiales de energía. REC tiene la sede en Noruega y cotiza en la bolsa de valores de Oslo (teletipo bursátil RECSOL). Nuestra plantilla con 1.600 empleados en todo el mundo, generaron en el año 2013 unos ingresos de 647 millones de dólares (USD).



www.recgroup.com